Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ



Никоноров Н.В., Сидоров А. И.

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ: оптическое волокно для систем передачи информации

Учебное пособие





Санкт-Петербург

Николай Валентинович Никоноров Александр Иванович Сидоров

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ: оптическое волокно для систем передачи информации

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Компьютерная верстка Заведующая РИО

А.В. Клементьева Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел СПб ГУИТМО Лицензия ИД №00408 от 05.11.99. Отпечатано на ризографе. Тираж 100 экз. Заказ №.

Подписано в печать

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ



Никоноров Н.В., Сидоров А. И.

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ:

оптическое волокно для систем передачи

информации

Санкт-Петербург

Н.В. Никоноров, А.И. Сидоров, «Материалы и технологии волоконной оптики: оптическое волокно для систем передачи информации». Учебное пособие, курс лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009 г. - 95 стр.

В курсе лекций описаны основы оптики волоконных световодов, основные типы оптических волокон для систем передачи информации, а также их характеристики. Рассмотрены основы оптического материаловедения волоконной оптики: требования к материалам, используемых в волоконнооптических линиях связи, основные классы неорганических И материалов, их характеристики и технологии синтеза. органических Рассмотрены основные методы создания заготовок ДЛЯ вытяжки оптических волокон и технологии производства волокон, используемых в системах передачи информации. Учебное пособие предназначено для обучающихся 200600 магистров, по направлению «Фотоника И оптоинформатика» по магистерской программе «Оптические материалы фотоники и оптоинформатики» при изучении дисциплин «Волноводная фотоника», «Материалы и технологии волоконной и интегральной оптики», а также обучающихся по направлению 200200 «Оптотехника» при изучении дисциплины «Материалы лазерной оптоэлектроники».

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения, и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов и магистров высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 200600 - «Фотоника и оптоинформатика» и 200200 – «Оптотехника».



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007-2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень выпускников и удовлетворить возрастающий подготовки спрос на информационной, В оптической специалистов И других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009. © Н.В. Никоноров, А. И. Сидоров, 2009.

- **2005 г.** Кафедра ОМиО переименована в кафедру оптоинформационных технологий и материалов (ОТиМ).
- 2006 г. Кафедра ОТиМ лидер в России по подготовке специалистов по оптическому материаловедению в области фотоники и оптоинформатики. Кафедра ведет совместные научные исследования с зарубежными компаниями Corning, Samsung, PPG.
- 2007 г. Первый выпуск бакалавров по направлению «Фотоника и оптоинформатика». Кафедра ОТиМ участник выполнения инновационной образовательной программы в СПбГУ ИТМО «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий», реализуемой в рамках Приоритетных Национальных Проектов «Образование».





СПбГУ ИТМО 2007 стал победителем B году конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007-2008 образовательной Реализация инновационной программы годы. «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ОПТОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ

- 1994 г. Организована СПбГУ ИТМО базовая кафедра при Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И.Вавилова - кафедра оптического материаловедения. Образование кафедры явилось логичным развитием тесных связей, которые в течение многих лет существовали между ГОИ и ИТМО. В частности, для широко привлекались преподавания В ИТМО ведущие сотрудники ГОИ, а ИТМО был постоянным источником, из которого ГОИ черпал новые молодые кадры. Кафедра начала подготовку специалистов по образовательному направлению «Оптотехника», «Оптические специальность технологии И материалы».
- **1999 г.** Реорганизация кафедры. На кафедре созданы три направления: оптическое материаловедение, информационная оптотехника, физическая оптика и спектроскопия. Кафедра переименована в кафедру оптического материаловедения и оптики (ОМиО).
- **2002 г.** Кафедра ОМиО вошла в состав нового факультета СПбГУ ИТМО фотоники и оптоинформатики.
- 2003 г. При кафедре создана учебно-исследовательская лаборатория материалов и технологий фотоники.
- 2004 г. Кафедра явилась одним из инициаторов и организаторов создания нового образовательного направления подготовки бакалавров и магистров «Фотоника и оптоинформатика». Кафедра начала подготовку бакалавров и магистров по направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика».

оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА: ТИПЫ,	
МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ	.6
1.1. Общая характеристика специальных оптических волокон	.6
1.1.1. Волокна, как активная среда, для волоконных лазеров и	
усилителей	.7
1.1.2. Волокна для накачки волоконных лазеров	.8
1.1.3. Волокна для оптических мультиплексоров и демультиплексоров	В
	8
1.1.4. Волокна для оптических модуляторов	.9
1.1.5. Волокна для оптических фильтров	.9
1.1.6. Волокна для компенсации дисперсии	10
1.1.7. Волокна для источников суперконтинуума	10
1.2. Активированные волокна для оптических усилителей и лазеров	11
1.2.1. Волоконные оптические усилители: материалы, технологии и	
применение	11
1.2.2. Волоконные лазеры: материалы, технологии и применение	30
1.2.3. Технологии производства активных волокон, легированных	
редкоземельными ионами	41
1.3. Фотоиндуцированные волоконные брэгговские решетки и их	
технологии	49
1.3.1. Брэгговские волоконные решетки показателя преломления	50
1.3.2. Технологии изготовления волоконных решеток	59
1.3.3. Применения волоконных решеток	71
1.4 Анизотропные одномодовые световоды	81
1.5. Фотоннокристаллические (микроструктурированные) волокна	86
1.5.1. Общие представления о фотонных кристаллах и их свойствах.	86
1.5.2. Свойства и применение фотоннокристаллических волокон	87
1.5.3. Технологии изготовления фотоннокристаллических волокон	90
ЛИТЕРАТУРА	93

ЛИТЕРАТУРА

1. Optical fiber amplifiers. Materials, devices and applications. by ed. Shoichi Sudo // Artech House, Inc, Boston, 1997, 627 p.

2. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. Erbium-doped fiber amplifiers/ Fundamentals and technologies // Academic Press, SanDiego, 1999, 460 p.

3. Canning J. Fiber laser and related technologies // Optics and lasers in engineering, 2006, №44, p.647-676

4. Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers // J. Appl. Phys., 1961, Vol.32, №1, p.36–39.

5. Koester C. J. and Snitzer E. Amplification in a fiber laser // Appl. Opt., 1964, Vol.3 №10, p.1182 .

6. А.М. Желтиков. Оптика микроструктурированных волокон // М.: Наука, 2004.

Пример заготовки для изготовления фотоннокристаллического волокна показан на рис.1.5.10.



Рис. 1.5.10. Заготовка для изготовления фотоннокристаллического волокна

После изготовления заготовки производится вытягивание из нее волокна в вертикальной печи (рис.1.5.11). При размягчении стеклянных трубок в печи возможно их схлопывание под действием сил поверхностного натяжения. Для предотвращения схлопывания полые каналы при вытяжке заполняют газом под давлением, либо торцы заготовки запаивают. В последнем случае расширение нагретого воздуха, заполняющего капилляры, препятствует их схлопыванию.



Рис. 1.5.11. Вытяжка фотоннокристаллического волокна

ВВЕДЕНИЕ

В курсе лекций описаны основы оптики волоконных световодов, основные типы оптических волокон для систем передачи информации, а характеристики. Рассмотрены также ИХ основы оптического волоконной оптики: требования материаловедения к материалам, используемых в волоконно-оптических линиях связи, основные классы неорганических и органических материалов, их характеристики И технологии синтеза. Рассмотрены основные методы создания заготовок для вытяжки оптических волокон и технологии производства волокон, используемых в системах передачи информации. Учебное пособие предназначено для магистров, обучающихся по направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика» по магистерской программе «Оптические материалы фотоники и оптоинформатики» при изучении дисциплин «Волноводная фотоника», «Материалы и технологии волоконной интегральной оптики», а также обучающихся по направлению 200200 изучении дисциплины «Материалы лазерной «Оптотехника» при оптоэлектроники».

Целью учебного пособия является:

Сформировать у студентов знания, умения и навыки в области материалов и технологий волоконной оптики, включая: основы оптики волоконных световодов, основные типы оптических волокон, используемых в волоконно-оптических линиях связи, их характеристики, эффекты и явления В оптических физические волокнах, основы оптического материаловедения волоконной оптики, основные классы материалов, используемых в волоконной оптике, их характеристики и технологии синтеза, основные методы создания заготовок для вытяжки оптических волокон и технологии производства волокон, используемых в системах передачи информации, с целью последующего использования полученных компетенций при разработке, производстве и использовании материалов и технологий для приборов и устройств современной фотоники и оптоинформатики.

ГЛАВА 1. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА: ТИПЫ, МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

1.1. Общая характеристика специальных оптических волокон

Подавляющее большинство оптических волокон для телекоммуникаций, поступающих на мировой рынок – волокна соответствующие международным стандартам: ITU T Recommendation G.652 - G.656. Это, так называемые магистральные оптические волокна, главная задача которых – доставка максимального объема информации с максимальной скоростью на максимальные расстояния с минимальными потерями. Объем рынка магистральных волокон для телекоммуникаций большим, остается довольно несмотря на трудно-предсказуемые временные замедления его роста (см. Введение).

фоне этих временных колебаний исключением является Ha уверенный рост (хотя и не в большом объеме) рынка так называемых оптических волокон. Главная залача специальных специальных оптических волокон – выполнение разных операций со световыми сигналами и потоками (усиление, модуляция, фильтрация и т.д.), а также работа волокон в специальных режимах и условиях (например, при высоких механических нагрузках - ударных или статических, высокой температуре, радиации, влажности, в УФ среднем ИК и дальнем ИК диапазонах). Поэтому требования к оптическим потерям в таких волокнах отходят на второй план. Типичная длина специальных оптических волокон не километры, как в случае магистральных волокон, а от единиц до нескольких десятков метров. Сегодня производители отмечают растущий интерес к специализированным волокнам для применения в оптических потребление Так например, мировое специальных компонентах. оптических волокон в 2007 году составило более 1,2 млрд. долларов (по данным компании ElectronCast).

Многие производители специальных оптических волокон расширяют свою клиентуру в сфере биомедицины, авиации и в военных отраслях. Другие производители видят больше возможностей ДЛЯ специальных оптических волокон в применении в датчиках и волоконноне менее, применение специальных оптических гироскопах. Тем оптических волокон в системах связи достигло более существенного прогресса и обещает еще не мало новых возможностей. Уже сейчас становится ясно, что в любом варианте дальнейшего развития специальные оптические волокна будут использоваться в оборудовании сетей связи следующего поколения.

В настоящее время можно назвать порядка двадцати типов специальных оптических волокон, отличающихся конструктивными характеристиками и основными свойствами. Ниже приводится основные сведения о некоторых широко распространенных специальных оптических волокнах, условно классифицированных по наиболее важным областям их применения в



Рис. 1.5.7. Сборка заготовки для вытяжки фотоннокристаллического волокна

В том случае, если необходимо создать волокно с большим количеством периодов, отдельные блоки заготовок спекают, вытягивают и группируют для формирования окончательной заготовки. Для изготовления волокон с полой сердцевиной в центральную часть заготовки помещают стеклянную трубку (рис.1.5.8,а), для изготовления волокон со сплошной сердцевиной – стеклянный стержень (рис.1.5.8,б).



Рис.1.5.8. Заготовки для фотоннокристаллических волокон с полой (а) и сплошной (б) сердцевинами

Одним ИЗ методов изготовления заготовок ДЛЯ фотоннокристаллических волокон является высверливание упорядоченной системы отверстий в сплошном стеклянном цилиндре (рис.1.5.9). Такая технология является более трудоемкой, однако она позволяет изготавливать фотоннокристаллические волокна со сложной геометрией и повышенной механической прочностью.



Рис. 1.5.9. Изготовление фотоннокристаллического волокна из сплошного стеклянного блока

несовершенством фотоннокристаллической структуры, вызванном сложностью технологического процесса их изготовления. В тоже время, теоретических фотоннокристаллические волокна с полой сердцевиной могут иметь потери на уровне 0.0005 дБ/км.

Уникальным свойством фотоннокристаллических волокон является свойств сильная зависимость дисперсионных ОТ геометрических параметров волокна. Выбор геометрии волокна позволяет реализовать положительную, отрицательную и нулевую дисперсии (рис.1.5.6), а также дисперсионной кривой. варьировать Поэтому наклон фотоннокристаллические волокна перспективны для использования в многоканальных волоконных линиях связи для компенсации уширения оптических импульсов.



Рис.1.5.6. Дисперсия фотоннокристаллических волокон при различных диаметрах отверстий. (Диаметр отверстий уменьшается с увеличением номера кривой)

Фотоннокристаллические волокна с малой хроматической дисперсией могут быть использованы в перестраиваемых лазерах, а также оптических мультиплексорах и демультиплексорах.

1.5.3. Технологии изготовления фотоннокристаллических волокон

более Фотоннокристаллические волокна имеют значительно сложную геометрию по сравнению с обычными типами волокон. Это накладывает отпечаток на технологию их изготовления. Технологический процесс состоит из двух основных этапов: изготовления заготовки волокна и вытяжки волокна. Заготовки для фотоннокристаллических волокон собирают ИЗ стеклянных трубок, формируя ИЗ них заданную периодическую структуру (рис.1.5.7).

оптической связи. Далее в разделах 5.2 – 5.5 приводятся более подробная информация (конструкции, материалы и технологии) о четырех типах специальных оптических волокон: активированных, фоточувствительных, анизотропных, фотонно-кристаллических.

1.1.1. Волокна, как активная среда, для волоконных лазеров и усилителей

Легированные эрбием оптические волокна разработаны для эрбиевых волоконных усилителей (EDFA) с широким диапазоном требований к техническим характеристикам, предназначеных для DWDM, CATV и других применений телесвязи. EDFA усилители включает усилители мощности, предусилители и линейные усилители для С- и Lдиапазонов.

В типичном эрбиевом волоконном усилителе, легированное эрбием волокно накачивается лазерным диодом с длиной волны 980 нм (или 1480 нм), чтобы обеспечить усиление в диапазоне 1550 нм. Эрбиевое волокно чтобы обеспечить быть выполнено таким, максимальную должно эффективность поглощения накачки с длиной волны 980 нм, а также оптимальное усиление сигнала в диапазоне 1550 нм. Это выполняется созданием волокна с высокой числовой апертурой с типичным значением от 0.23 до 0.25, чтобы достигнуть приемлемого совмещения областей поля накачки и поля сигнала. Длина волны отсечки волокна имеет также критическое значение в его конструкции, поскольку это определяет длину волны, на которой волокно должно работать в одномодовом режиме. Типичное эрбиевое волокно имеет такую длину волны отсечки, которая гарантирует, что накачка будет распространяться в одномодовом режиме, обеспечивающем максимальное перекрытие между областью поля и областью эрбиевых ионов в сердцевине волокна.

Иттербиевое волокно и иттербиевое волокно с двойной оболочкой используются в источниках излучения большой мощности и усилителях. Эти волокна были разработаны, чтобы отвечать требованиям к оптическим усилителям большой мощности, индустриальным и военным лазерам, а также инфракрасным источникам. Волокна были специально разработаны, чтобы эффективно объединить одномодовый сигнал и высокую мощность накачки от многомодового диода в пассивное волокно с двойной оболочкой. Объединяя дешевые с большой выходной мощностью многомодовые диоды накачки на длине волны 915 или 976 нм с этими волокнами, можно легко достигать многоваттных уровней мощности с эффективным отношением электрической мощности к оптической. Используя ступенчатые волокна в режиме непрерывного излучения, киловатт выходная мощность достигает С углом расходимости ограниченной лишь дифракцией. В импульсном режиме может быть достигнута средняя мощность порядка 100 ватт даже для фемтосекундного

волоконного лазера. Усилители с иттербиевым волокном с двойной оболочкой - привлекательная технология для сфазированных решеток большой мощности. Они имеют много преимуществ, включая большое усиление и легкость в управлении термическим способом.

1.1.2. Волокна для накачки волоконных лазеров

Эти волокна имеют многомодовую сердцевину соответствующую по оболочки диаметру внутренней иттербиевого волокна. размерам используемого в качестве активного элемента для волоконных лазеров и усилителей. Они используются для передачи энергии излучения от оптического источника накачки волоконного лазера (или усилителя) к его элементу и доставки выходного излучения лазера для активному различных применений. Они могут быть использованы в качестве соединителей – пигтейлов (в англоязычной литературе - pigtails) для лазерных диодов накачки и как плечи для волоконных ответвителей и сумматоров (комбайнеров). Комбайнер суммирует выходную мощность от нескольких лазерных диодов накачки в одно волокно, увеличивая тем самым мощность накачки.

Данные волокна имеют следующие особенности: они многомодовые, имеют большую числовую апертуру (~0,45), затухание на длине волны 915 нм около 3 дБ/км. Некоторые волокна для передачи энергии излучения от оптического источника накачки могут перераспределять обратно распространяющийся свет, отраженный от активного волокна лазера, который является главной причиной отказов многомодовых лазерных диодов накачки.

1.1.3. Волокна для оптических мультиплексоров и демультиплексоров

Оптические мультиплексоры и демультиплексоры ввода/вывода обычно создаются с использованием фоточувствительных волокон (см. раздел 1.3). Способность оптического волокна под действием света преломления сердцевины изменить показатель названо фоточувствительностью волокна. Когда ультрафиолетовое излучение освещает легированную сердцевину волокна германием, ультрафиолетовые фотоны разрывают атомные СВЯЗИ, показатель преломления сердцевины изменяется и после облучения остается неизменным. Фоточувствительные волокна используются для создания брэгговских волоконных решеток, которые, являются главным мультиплексоров И демультиплексоров ввода/вывода компонентом Волоконная брэгговская решетка представляет собой излучения. оптическое волокно с периодическим изменением показателя преломления вдоль его сердцевины. Облучая фоточувствительное волокно лазером через фазовую маску, можно создать волоконную брэгговскую решетку.



Рис.1.5.5. Фотоннокристаллические волокна (пояснения в тексте)

Фотоннокристаллическое волокно, показанное на рис., в имеет сплошную сердцевину и также обладает выраженными нелинейнооптическими свойствами. В противоположность ему, у волокна с полой сердцевиной, показанного на рис.1.5.5,г нелинейно-оптические свойства проявляются слабо. Последние два типа волокон привеняются в качестве спектральных селекторов и для компенсации дисперсии в волоконных линиях связи.

Некоторые достоинства и недостатки фотоннокристаллических волокон, по сравнению с обычными, приведены в табл.

Таблица 1.5.1. Сравнительные характеристики обычных и фотоннокристаллических			
волокон			
Характеристики	Обычное волокно	ФК-волокно	
Числовая апертура, NA	0.06	> 0.6 достигнута	
		0.9 - предел	
Диаметр волокна для	7	> 40	
одномодового режима, мкм	λ= 1540 нм	λ= 300 – 2000 нм	
Площадь сердцевины, мкм ²	50	от 3 до 1000	
Нелинейные эффекты	полный набор	отсутствуют или ярко	
		выражены	
Потери, дБ/км	0.2	10 -достигнуты	
	близки к теоретическому	теоретический предел	
	пределу	0.0005	

Из таблицы видно, что фотоннокристаллические волокна могут иметь большую числовую апертуру, что облегчает ввод излучения в них. Нелинейно-оптические эффекты в фотоннокристаллических волокна могут быть подавлены или, наоборот, усилены. Потери в фотоннокристаллических волокнах, в настоящее время значительно превышают потери в волокнах обычного типа. Это связано с



Рис.1.5.3. Структура фотоннокристаллического волокна и каналирование в нем лучей

В результате этого в сердцевине фотоннокристаллического волокна формируются волноводные моды, подобные модам обычных волокон (рис.1.5.4)



Рис.1.5.4. Моды фотоннокристаллических волокон

На рис.1.5.5 показаны поперечные сечения некоторых типов фотоннокристаллических волокон, обладающих особыми свойствами. Первый тип волокна (рис.1.5.5,а) многомодовое волокно со сплошным сердечником и большой числовой апертурой NA. Такие волокна могут применяться для накачки волоконных лазеров. Одномодовое фотоннокристаллическое волокно показано на рис.1.5.5,б. В таких волокнах подбором диаметра каналов можно в широких пределах изменять дисперсию. Подобные волокна обладают выраженными нелинейнооптическими свойствами и применяются в волоконных лазерах, а также для управления оптическими сигналами.

Основным свойством этой решетки является отражение распространяющегося по волокну света в узкой полосе, которая сцентрирована около брэгговской длины волны. Волоконная брэгговская решетка обладает высоким коэффициентом отражения на определенной длине волны, малыми вносимыми потерями, высокой избирательностью длины волны и малыми перекрестными помехами. Поэтому она является весьма привлекательным устройством для установки в мультиплексорах и демультиплексорах ввода/вывода. Чтобы отделить входной сигнал от распространяющегося отраженного сигнала. используется встречно оптический невзаимный циркулятор (см. раздел 1.3). Каждый мультиплексор ввода/вывода имеет два циркулятора: один для ввода определенной длины волны, другой – для вывода. Циркулятор обычно вносит потери от 0,5 до 1 дБ. Вносимые потери растут тем больше, чем больше решеток и циркуляторов в мультиплексоре (демультиплексоре).

1.1.4. Волокна для оптических модуляторов

Существует два типа оптических волноводных модуляторов: планарные и волоконные. Оба типа чаще всего бывают фазовыми модуляторами. Планарный модулятор построен как оптический волновод на подложке (интегрально-оптический модулятор). Он обеспечивает модуляцию и согласование с волокнами, установленными на входе и планарного которые могут обычными выходе чипа, быть или одномодовыми волокнами или поляризационными волокнами.

Другим вариантом внешних модуляторов является полностью волоконный акустооптический модулятор. Наиболее часто полностью волоконные акустооптические модуляторы представляет собой устройства осуществляющие сдвиг частоты на базе поверхностных акустических волн. В них используется явление связи поляризованных мод в поляризационных волокнах или пространственная связь мод в обычных одномодовых волокнах.

Таким образом, оптических волоконных модуляторах В используются как поляризационные волокна, так и обычные оптические волокна. Одномодовые волокна с двулучепреломлеием передают оптическое излучение двумя несвязанными модами, которые линейно поляризованы, взаимно перпендикулярны и имеют различные фазовые распространения. скорости Поляризационные же волокна сконструированы таким образом, чтобы передавать входной свет только линейной поляризации. Желаемое направление одной плоскости поляризации получается на основе принципа создания механического напряжения, используя в волокне эллиптическую оболочку окружающую круглую сердцевину или круглую оболочку окружающую эллиптическую сердцевину, а также другие структуры волокна.

⁹

1.1.5. Волокна для оптических фильтров

В настоящее время существуют много типов оптических волоконных фильтров: фильтры на дифракционных или брэгговских решетках, фильтры Фабри-Перо и Маха-Цандера, и др. Фабри-Перо фильтр представляет собой резонатор, состоящий из двух связанных между собой оптических волноводов с частично отражающими зеркалами на концах. Фильтры Маха-Цандера построены с использованием двух направленных ответвителей и двух обычных волокон, одно из которых является опорным плечом, а в другом показатель преломления варьируется в соответствии с управляющим сигналом. Брэгговский волоконный фильтр представляет собой фоточувствительное волокно, на части которого сформирована брэгговская решетка. Характеристики такого волокна представлены в разделе 5.3. Если изменять (управлять) период решетки брэгговского фильтра, то он становится перестраиваемым фильтром. Период решетки может быть изменен за счет нагрева или механических напряжений.

1.1.6. Волокна для компенсации дисперсии

Компенсация дисперсии может быть выполнена несколькими методами. Например, могут применяться специальные волокна или устройства именуемые компенсаторами дисперсии (dispersion compensating modules). Эти волокна имеют большую отрицательную дисперсию (80-100 ps/nm), а также отрицательный наклон дисперсионной кривой. С помощью волокон, компенсирующих дисперсию, можно осуществить широкий круг операций.

Вторым компенсации дисперсии примером могут служить волоконные брэговские решетки с переменным периодом. В этих волокнах период изменяется вдоль волокна линейно. Вследствие этого, волны решеток, расположенных на разных разной длины отражаются от входа, расстояниях ОТ приводит разному времени что К ИХ распространения И соответственно к компенсации хроматической дисперсии. Все компенсаторы с линейным периодом решетки являются неперстраиваемыми устройствами. В перестраиваемых компенсаторах изменение периода решетки вдоль волокна должно быть нелинейным. Варьирование компенсации дисперсии достигается растягиванием волокна механическим или тепловым способом.

Таким образом, для компенсации дисперсии используются оптические волокна с отрицательной дисперсией и фоточувствительные волокна, из которых получают брэгговские волоконные решетки с переменным периодом.

1.1.7. Волокна для источников суперконтинуума

Особым примером специальных оптических волокон являются

имеет место похожая ситуация. Фотон, который одновременно является электромагнитной волной, интерферирует с периодической структурой фотонного кристалла. В результате появляются диапазоны разрешенных и запрещенных энергий фотонов (или длин волн электромагнитной волны) в фотонном кристалле. Фотоны с запрещенными энергиями отражаются от фотонного кристалла; а фотоны с разрешенными энергиями в него проникают. Для таких фотонов он прозрачен.

На рис.1.5.2 показаны спектры отражения 1D-фотонных кристаллов – совершенного (*a*) и с дефектом (б). В нижней части рисунков схематично представлены структуры их энергетических зон.



а Рис.1.5.2. Спектр отражения (а) и энергетическая зона (б) одномерного фотонного кристалла

Из рисунка видно, что в совершенном фотонном кристалле возникает широкая спектральная полоса отражения – «запрещенная зона» фотонного кристалла. Это свойство фотонного кристалла используется в фотоннокристаллических волокнах для формирования волноводных мод.

1.5.2. Свойства и применение фотоннокристаллических волокон

В фотоннокристаллическом свойствами фотонного волокне кристалла обладает только среда, сердцевину. В окружающая его диэлектрических волноводах обычного типа каналирование обеспечивается эффектом полного внутреннего отражения от границы сердцевины волновода с окружающей средой. В фотоннокристаллических волноводах каналирование происходит в результате интерференции волны в среде с фотоннокристаллическими свойствами и отражения от нее (рис.1.5.3).

1.5. Фотоннокристаллические (микроструктурированные) волокна

1.5.1. Общие представления о фотонных кристаллах и их свойствах

Фотоннокристаллические волноводы и волокна являются новым типом оптических волноводов. Их появление связано с созданием и исследованием новых оптических объектов – фотонных кристаллов. Фотонные кристаллы представляют собой периодические структуры из диэлектриков с отличающимся показателем преломления. Период этих структур – порядка длины волны. На рис.1.5.1 показаны простейшие варианты одномерного, двумерного и трехмерного фотонных кристаллов. Одномерный (1D) фотонный кристалл (рис.1.5.1, a) представляет собой чередующиеся диэлектрические слои с высоким и низким показателями преломления. Как правило, оптическая толщина этих слоев кратна $\lambda/4$. Отсюда очевидно, что брэгговский отражатель и брэгговский волновод то же время одномерными фотонными являются В кристаллами. Простейший (2D) фотонный (рис.1.5.1,б) двумерный кристалл представляет собой диэлектрическую пластину периодически С расположенными отверстиями. Трехмерный (3D) фотонный кристалл сформирован, например, из диэлектрических может быть шаров (рис.1.5.1,в). Подобный фотонный кристалл называется искусственным опалом, так как его структура и оптические свойства близки к структуре и свойствам природного полудрагоценного камня опала.



Рис.1.5.1. Одномерный (а), двумерный (б) и трехмерный (в) фотонные кристаллы

Название фотонных кристаллов вызвано тем, что свойства фотонов в таких периодических структурах подобны свойствам электронов в периодическом электрическом поле атомов обычных кристаллов. Известно, что электрон обладает волновыми свойствами. В обычном кристалле возникает интерференция между «волной-электроном» и периодическим электрическим полем атомов. Это приводит к появлению разрешенных и запрещенных диапазонов длин волн или энергий электронов в кристалле. Так возникают валентная зона и зона проводимости – диапазоны энергий, разрешенных для электрона, и запрещенная зона – область энергий, которые электрон в кристалле принимать не может. В фотонном кристалле

фотонно-кристаллические волокна (более подробно они описаны в разделе 5.5). Благодаря проявлению серии уникальных свойств они находят применение не только в оптической связи, но и в передаче больших мощностей, чувствительных датчиках, нелинейных устройствах и других областях. В фотонно-кристаллических волокнах используется область оболочки волокна с продольными воздушными каналами, которая окружает сердцевину, где сосредоточено излучение. Их внутренняя периодическая структура, изготовленная из капилляров, заполненных воздухом, представляет собой в поперечном сечении гексогональную или квадратную решетку. Манипулирование типом решетки, ее шагом, формой воздушных каналов и показателем преломления стекла позволяет получать свойства, которые не существуют у обычных волокон. Так, например, ярко выраженные нелинейные свойства делают фотонно-кристаллические волокна способными генерировать суперконтинуум, т.е. преобразовывать свет определенной длины волны в свет с более длинными и более короткими волнами. Таким образом, возможно создание широкополосных источников света на новых принципах.

1.2. Активированные волокна для оптических усилителей и лазеров

1.2.1. Волоконные оптические усилители: материалы, технологии и применение

1.2.1.1.Общая характеристика оптических усилителей в ВОЛС

Хорошо известно, что через каждые 50 - 100 км волоконнооптического тракта происходит ослабление оптического сигнала на 10 - 20 дБ, что требует его восстановления. До начала 90-х г. в действующих линиях связи единственным способом компенсации потерь в линии было применение регенераторов.

Регенератор – это сложное устройство, включающее в себя как электронные, так и оптические компоненты. Регенератор принимает модулированный оптический сигнал (с высокой степенью сжатия), преобразует его в электрический сигнал с той же степенью сжатия, усиливает его, и затем переводит усиленный электрический сигнал обратно в оптический с той же модуляцией и степенью сжатия (рис.1.2.1). Регенератор состоит из трех важнейших компонентов: оптический приемник, электронный усилитель и оптический передатчик (рис.1.2.1). Регенераторы работают с одной длиной волны и экономически не примеру, в мультиволновых системах выгодны. К требуется И соответствующее число регенераторов. Поэтому, принимая во внимание, что в оптической линии установлено несколько регенераторов (обычно

через каждые 50 км), стоимость такой системы оказывается весьма значительной.





О-Е – переход от оптики к электронике Е-О – переход от электроники к оптике

Пропускная способность сети ИЛИ линии лальней связи С регенераторами ограничена возможностями электроники (на сегодняшний день предельная скорость обработки сигналов для электроники порядка 40 Гбит/с, а в 1986 г. она не превышала 1 Гбит/с). Интенсивные исследования нескольких групп ученых в 1985-1990 годах, каскад открытий и изобретений привели, в конечном счете к появлению технически совершенных промышленных оптических усилителей (например, эрбиевых Erbium-Doped Fiber Amplifier – EDFA). На рис.1.2.2 показана топология оптической сети с оптическим усилителем на основе эрбиевого волокна. Ключевыми элементами такой схемы являются:

- мультиплексор. Это оптическое устройство, которое объединяет 1) несколько спектральных каналов с длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, ..., \lambda_n$ в один оптический канал. В литературе такие устройства называют «wavelength division multiplexing» – WDM). В современных промышленных связи WDM объединяет 40 линиях ЛО спектральных каналов. WDM стоит на входе оптической линии связи. Если WDM стоит на выходе оптической линии связи, то его демультиплексором. Демультиплексор (WDM) называют выполняет обратную задачу – выбирает определенные длины волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, ..., \lambda_n$ и разводит их по отдельным спектральным каналам.
- 2) оптическое волокно. Современное оптическое кварцевое волокно имеет оптические потери 0.2 дБ/км. На сегодняшний день это предельные значения для кварцевого волокна.
- 3) оптический усилитель. Как правило, это оптический эрбиевый волоконный усилитель (EDFA) устройство, которое усиливает

заготовки отличается сложностью и, поэтому, плохой воспроизводимостью.

Наиболее приемлемым типом анизотропного ОВ для промышленного производства является световод с эллиптической напрягающей оболочкой (рис. 1.4.2).

Технология изготовления такого оптического волокна заключается в изготовлении заготовки MCVD методом с концентричной структурой внутренних слоев, абразивной обработке круглой заготовки и её высокотемпературном округлении. Напрягающая оболочка содержит 15-20 мол.% В₂O₃ и GeO₂, в количестве необходимом для компенсации изменения показателя преломления, обусловленного введением бора. Окружающая сердцевину изолирующая оболочка необходима для снижения оптических потерь на длине волны более 1 мкм, обусловленных колебанием атомов В-О связи. Защитная оболочка изолирует осаждаемые слои от водорода, диффундирующего из опорной кварцевой трубы. Все оболочки в стекловолокне имеют величину показателя преломления близкую к показателю преломления кварцевого стекла.

Абразивная обработка заготовки заключается в нарезании двух канавок с диаметрально противоположных её сторон. При последующем высокотемпературном округлении канавки исчезают, заготовка становится круглой, а напрягающая оболочка эллиптичной.

Оптические потери световодовов зависят от многих факторов, основным из которых является дефицит кислорода в германосиликатном стекле сердцевины. Обусловленное таким дефектом поглощение света растет с увеличением температуры вытягивания и содержания GeO₂, а также с уменьшением диаметра стекловолокна. В MCVD технологии изготовления анизотропного волокна с целью снижения их затухания разработан комплекс технических решений, основными из которых являются следующие:

- 1. Отжиг изготовленных из стекла марки КВ опорных труб при 900°С в течение 4-5 часов для удаления из них свободного водорода.
- 2. Осаждение слоев сердцевины после предварительного высокотемпературного сжатия трубки до диаметра канала 9-10 мм с целью уменьшения поверхности испарения, которое приводит к восстановлению GeO₂.
- 3. Сжатие трубки в штабик за несколько проходов горелки при продувке внутреннего канала кислородом с возможностью свободного испарения GeO₂ с тем, чтобы в восстановленной части поверхностного слоя его содержание стало меньше.
- 4. Снижение температуры вытягивания волокна до уровня 1950°С.

Сегодня характеристики анизотропных одномодовых световодов отечественного производства ($\alpha \le 1$ дБ/км; $h \le 10^{-5}$ 1/м) не уступают качеству образцов зарубежного изготовления.

) SiO₂+GeO₂

) $SiO_2+B_2O_3+GeC$

SiO2

Рис.1.4.1 Структуры заготовок, полученных методом сверления (1), травления (2), коллапсирования при разрежении (3), шлифовки (4) и прессования (5) с эллиптической

сердцевиной (А) и эллиптической напрягающей оболочкой (Б).

Световоды с эллиптической сердцевиной напрягающей или оболочкой несколько уступают по оптическим свойствам ОВ типа «PANDA», однако, выгодно отличаются по стоимости, а также простоте и стабильности технологического процесса их изготовления. Производство таких световодов в мировой практике базируется, в основном, на MCVD методе изготовления заготовок. Оптические волокна с эллиптическими элементами её структуры можно получить одним из трех методов (рис.1.4.1): высокотемпературным сжатие трубки с нанесенными слоями при разрежении в несколько мм водного столба; плоскопараллельным шлифованием с округлением при 2100-2200°С и прессованием круглой заготовки при последовательном нагреве её участков до 1800-2000°С.



Рис. 1.4.2. Конструкция оптического волокна с эллиптической оболочкой

MCVD методом можно также изготовить BC типа "галстук-бабочка" с применением одностороннего внутреннего травления слоев напрягающей оболочки на внутренней поверхности трубки, нагреваемой с диаметрально противоположных сторон. Однако процесс изготовления

оптические сигналы в диапазоне длин волн 1.53- 1.58 мкм. Диапазон усиления эрбиевого усилителя совпадает с диапазоном минимальных оптических потерь в кварцевом волокне. Коэффициент усиления в EDFA составляет 10 дБ/мВт.



Рис.1.2.2. Топология оптической сети (пример) со спектральным мультиплексированием и ее основные компоненты: оптический мультиплексор/демультиплексор, оптическое волокно, оптический усилитель

Одним из основных узлов современных волоконно-оптических систем связи со спектральным уплотнением каналов (WDM- и DWDM- систем) является оптический усилитель. Создание широкополосных оптических усилителей (наряду с другими элементами) позволило в конце 90-х годов создать экспериментальные волоконно-оптические системы связи со спектральным мультиплексированием более ста каналов и достичь скорости передачи информации более 1 Тбит/с.

Терабитные скорости передачи в системе достигаются за счет применения временного (TDM) и спектрального (WDM) уплотнения (мультиплексирования) сигналов. Полная скорость передачи информации B в мультиплексной системе равна произведению числа спектральных каналов N на скорость передачи информации в одном канале b:

$$B = N \cdot b$$

Величина *b* определяется возможностью технологий временного уплотнения сигналов. В настоящее время практически реализованы системы со скоростями передачи в одном канале до 40 Гбит/с, имеются сообщения о многоканальной экспериментальной системе со скоростями передачи в одном канале до 160 Гбит/с. Число спектральных каналов N в системе, как уже говорилось выше, может достигать 100, с разделением по длине волны $\Delta\lambda$ между соседними каналами, равными (0,4-0,8) нм. Таким образом, для реализации протяженных терабитных систем требуются широкополосные оптические усилители, спектральная полоса которых должна, по крайней мере, превышать 30 нм.

В настоящее время для волоконно-оптических систем связи разработаны три типа оптических усилителей: полупроводниковые

оптические усилители, волоконные усилители на основе редкоземельны ионов (например, эрбиевые) и рамановские волоконные усилители (ВКР усилители).

Полупроводниковые оптические усилители не нашли применения в системах со спектральным уплотнением каналов, поскольку физические особенности их функционирования приводят к неприемлемой величине перекрестных помех между каналами. Самое главное преимущество полупроводниковых оптических усилителей состоит в том, что они изготовляются на основе *InGaAsP* и поэтому имеют малые размеры, компактны и могут быть интегрированы с другими полупроводниковыми и оптическими компонентами. Несколько полупроводниковых усилителей могут быть объединены в массив Они имеют следующие характеристики:

- относительно высокое усиление (20 дБ)
- предел выходной мощности составляет 5-10 дБ/м
- широкий рабочий диапазон
- работают в области 0.8, 0.9, 1.0, 1.3, 1.5 мкм.

Недостатки полупроводниковых оптических усилителей:

- температурная зависимость длины волны
- высокий шум-фактор
- большие перекрестные помехи



Рис.1.2.3. Полосы усиления редкоземельный ионов и спектр оптических потерь кварцевого волокна

Наиболее широкое применение в настоящее время находят волоконные усилители. Современный уровень развития технологий позволяет вводить в световедущую жилу кварцевого волокна различные примеси, в частности, редкоземельные элементы, имеющие спектр люминесценции в окнах прозрачности волокна (например, $\lambda = 1,54$ мкм, $\lambda = 1,32$ мкм и др.) (рис.1.2.3) и пики поглощения в области генерации оптических разъемах.

Двулучепрелемление световодов, вызванное анизотропией напряженного состояния для наиболее распространенной структуры оптического волокна с напрягающей эллиптической оболочкой, зависит от ряда параметров:

$$B = CE (1-\nu)^{-1} (\Delta \alpha) (T_g - T_o) (a-b) (a+b)^{-1}$$
(1.3.5)

где С – фотоупругая константа сердцевины, Е – модуль Юнга кварцевого стекла, ν - коэффициент Пуассона, $\Delta \alpha$ - разность коэффициентов термического расширения эллиптической оболочки и кварцевого стекла, T_g и T_o – температура размягчения напрягающей оболочки и комнатная температура, соответственно, (a-b)/(a+b) – эллиптичность оболочки.

В настоящее время наиболее перспективными ОВ для датчиков являются анизотропные волокна (рис.5.4.1), в которых создаются напряжения определенными структурными элементами, существенно отличающимися коэффициентом термического расширения от основного материала.



В обычном одномодовом световоде с круглым поперечным сечением сердечника и осесимметричным распределением показателя преломления распространяются две ортогонально поляризованные моды HE_{11} , которые принято обозначать HE_{11}^{x} и HE_{11}^{y} . При введении в волокно одной из этих мод состояние её поляризации изменяется из-за преобразования в ортогональную моду под воздействием внешних факторов: давления, температуры, вибраций и т. д. Линейно поляризованное излучение становится эллиптически поляризованным. Перекачка световой энергии из одной моды в другую обусловлена тем, что они вырождены, то есть их постоянные распространения β_x и β_y одинаковы.

Состояние поляризации излучения можно сохранить, если нарушить симметрию формы или показателя преломления сердцевины. В этом случае β_x β_y будут отличаться, ограничивая степень превращения ортогональных мод. Оптические волокна такого типа называются анизотропными одномодовыми световодами. Геометрическая анизотропия создается превращением круглой формы сердцевины в эллиптическую, а анизотропия показателя преломления обеспечивается ортогональной ориентацией напряжений при использовании материалов с разными коэффициентами термического расширения. Мерой анизотропии такого световода является модовое двулучепреломление:

$$\mathbf{B} = (\beta_{\rm x} - \beta_{\rm y})/(2\pi/\lambda) \tag{1.4.1}$$

которое рассчитывают на основании измерения длины биений ортогональных мод (длины, на которой фазовый набег поляризационных мод составляет 2*π*) L_b:

$$\mathbf{B} = \lambda / \mathbf{L}_{\mathrm{b}} \tag{1.4.2}$$

Чем меньше длина биений, тем больше двулучепреломление и, следовательно, меньше связь между поляризационными модами.

Доля мощности введенного в световод линейно-поляризованного излучения P_x, перешедшая в ортогональную (паразитную) моду P_y, характеризуется коэффициентом ослабления η :

$$\eta = 10 \, \lg(P_v/P_x) = 10 \, \lg(hL) \tag{1.4.3}$$

где h – степень сохранения поляризации излучения, L – длина световода.

Из этого уравнения следует, что:

$$h = (P_v/P_x)L^{-1}$$
(1.4.4)

Двулучепреломление OB с некруглой сердцевиной, имеющей большую (а) и малую (b) оси, при эллиптичности (a/b-1) более единицы пропорционально квадрату разности показателей преломления сердцевины и оболочки (Δn^2). Такие световоды отличаются простотой технологии их изготовления, однако создают определенные проблемы при стыковке в

полупроводниковых лазеров ($\lambda = 800$ нм; $\lambda = 980$ нм; $\lambda = 1480$ нм), через которые может осуществляться накачка активированного оптического волокна излучением этих лазеров. На рис.1.2.3. показана ширина полос усиления редкоземельных ионов (неодима, празеодима, тулия, иттербия и эрбия), которые используются в волоконных оптических усилителях, на фоне спектра пропускания оптического кварцевого волокна. Эрбий и тулий имеют самые широкие полосы усиления.

Самыми распространенными в настоящее время являются эрбиевые волоконные оптические усилители (erbium doped fiber amplifiers – EDFA). Главным образом это определяется спектром люминесценции ионов эрбия, лежащим в области длин волн $\lambda = 1,54$ мкм - области минимальных потерь современных кварцевых световодов (рис.1.2.3). Рассмотрим принцип работы эрбиевого волоконного усилителя и его характеристики.

1.2.1.2. Принцип работы эрбиевого усилителя

Принцип работы эробиевых усилителей основан на явлении усиления света при вынужденном излучении (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Это то же самое явление, которое обеспечивает возникновение генерации в лазерах и, собственно говоря, дало им название LASER. Возможность усиления света в световодах, легированных ионами эрбия, обуславливается схемой уровней энергии данного редкоземельного элемента, представленной в упрощенном виде на рис.1.2.4.





Усиление света в эрбиевом усилителе происходит благодаря переходу между уровнями 2-1 (${}^{4}I_{13/2} \rightarrow {}^{4}I_{15/2}$). Каждый из этих уровней расщеплен на ряд подуровней из-за взаимодействия ионов эрбия с внутрикристаллическим полем кварцевого стекла (эффект Штарка). Основной уровень ${}^{4}I_{15/2}$ расщепляется на 8 штарковских подуровней,

первый возбуждённый уровень ${}^{4}I_{13/2}$ расщепляется на 7 штарковских подуровней. Между ними может происходить 56 оптических переходов, которым и приписываются полосы сложной формы с максимумом 1.54 мкм как в спектре поглощения, так и в спектре люминесценции. Энергетические зазоры между штарковскими подуровнями сравнимы по величине со средней тепловой энергией kT при комнатной температуре. Поэтому населённости верхних и нижних штарковских подуровней как для основного уровня ${}^{4}I_{15/2}$, так и для возбуждённого ${}^{4}I_{13/2}$ уровня различаются весьма существенно. Это является основной причиной различия контуров полосы в спектре поглощения и в спектре люминесценции.

Под действием накачки за счет поглощения фотонов накачки ионы эрбия переходят из основного состояния (уровень 1) в верхнее возбужденное состояние (уровень 3), которое является короткоживущим (время жизни $\tau_3=1$ мкс), и за счет процессов релаксации переходят в долгоживущее состояние (на метастабильный уровень 2 энергии). Поэтому число ионов, находящихся на уровне 2, при соответствующей мощности накачки может превышать число ионов на уровне 1. Уровень 1 называется основным состоянием, т.к. в отсутствие накачки практически все ионы находятся на ЭТОМ энергетическом уровне. Доля эрбия частиц, находящихся на остальных уровнях, в отсутствие накачки мала.

Число ионов в единице объема, находящихся на некотором уровне энергии, называется населенностью этого уровня энергии. В нормальных условиях, т.е. в отсутствие накачки, населенность основного уровня энергии вещества максимальна, населенности всех остальных уровней энергии быстро уменьшаются с увеличением энергии уровня. Состояние среды, при котором населенность некоторого более высокого уровня энергии иона превышает населенность некоторого нижележащего уровня, получило название состояния с инверсией населенностей уровней, или, более коротко, **инверсией населенности**.

Если в среду с инверсией населенности попадает излучение с энергией фотона, совпадающей с энергией перехода из метастабильного состояния в основное, то с большой вероятностью происходит переход иона с метастабильного уровня 2 на основной уровень 1 с одновременным рождением еще одного фотона. Увеличение числа фотонов при их взаимодействии с ионами эрбия означает, что происходит усиление света, распространяющегося в среде с инверсией населенности.

Отметим, что длина волны и спектр усиления жестко определены типом активных ионов. Тот факт, что спектр усиления волокна, легированного ионами эрбия, совпадает с областью минимальных потерь кварцевого оптического волокна, является удачным совпадением.

Не все ионы эрбия находятся в метастабильном состоянии и обеспечивают усиление. Часть ионов находится на уровне 1 и эти ионы, взаимодействуя с фотонами, энергия которых совпадает с энергией перехода, эффективно их поглощают, переходя на уровень 2. При этом

Кольцо может быть деформировано по одному из двух направлений, меняя период решетки на изгибах, соответственно на дальнем или на ближнем конце. Таким образом, может не только изменяться величина компенсации дисперсии, но и ее знак (рис.1.3.20). Такое простое решение открывает широкие перспективы для производства дешевых перестраиваемых компенсаторов дисперсии нам основе брэгговских решеток





отрицательной дисперсией





1.4 Анизотропные одномодовые световоды

Наряду с магистральными линиями связи волоконные световоды широко используются В самых разнообразных измерительных, диагностических высокочувствительных контроля И системах И анизотропных управления. Ha основе одномодовых волоконных световодов создаются датчики для измерения различных физических такие уникальные приборы как волоконно-оптические величин И гироскопы.

использует достаточно дорогостоящее оборудование и имеет ограниченное быстродействие.

Более высокое быстродействие обеспечивают схемы измерений, в которых спектральное смещение решетки преобразуется в изменение интенсивности оптического сигнала, попадающего на фотоприемник. Это может быть реализовано, например, при использовании дополнительного спектрального фильтра с наклонной характеристикой пропускания. Таким фильтром в частности может служить ДПВР. Наклон спектральной зависимости фильтра задает динамический диапазон и чувствительность волоконного датчика.

Указанные схемы позволяют измерить физическую величину в месте нахождения ВБР, вместе с тем часто возникают задачи измерения пространственного распределения этой величины. Для этого разработаны схемы, позволяющие мультиплексировать чувствительные элементы, в том числе расположенные в одном световоде. К числу таких схем следует отнести:

- спектральное мультиплексирование каналов, при котором чувствительные элементы разнесены на различные длины волн;

- использование оптических переключателей, подключающих тот или иной чувствительный элемент к системе измерения;

- пространственно-временное мультиплексирование, при котором отклик от каждой из решеток регистрируется в различные моменты времени;

- комбинированные схемы, включающие в себя несколько принципов мультиплексирования каналов, перечисленных выше.

Перечисленные схемы измерения λ_{BG} , как правило, обеспечивают точность измерения температуры ~0.1°С и относительного удлинения ~10⁻⁶.

Существует также большое число работ, посвященных важным на практике вопросам разделения влияния температуры и деформации на сдвиг резонансной длины волны решетки, а также одновременному измерению этих параметров.

1.3.3.4. Применение волоконных брэгговских решеток для компенсации дисперсии

Как уже отмечалось в 1.3.1.3 для компенсации дисперсии может быть использованы чирпированные брэгговские решетки, т.е. решетки с линейно изменяющимся периодом. Рассмотрим другой способ управления и компенсации дисперсии в оптическом волокне при помощи брэгговской решетки с постоянным периодом.

Компания Fujikura предложила простой тип компенсатора хроматической дисперсии на основе брэгговской решетки на гибком кольце (рис.1.3.19). Длина решетки и и диаметр кольца подбирались таким образом, что решетка занимала примерно 1/4/ крольца по окружности.

спектр усиления ионов эрбия практически совпадает со спектром поглощения (рис.1.2.5). Если количество ионов, находящихся на уровне 2, меньше числа ионов, находящихся на основном уровне 1, то наблюдается поглощение.



Рис.1.2.5. Спектр поглощения, кривая 1 (переход *4115/2 -4113/2*) и люминесценции, кривая 2 (переход *4113/2 -4115/2*) эрбия в области 1.5 мкм

Именно поэтому необходимым условием усиления света является создание инверсии населенностей между двумя рабочими уровнями энергии 2 и 1. Для создания инверсии населенностей в эрбиевом усилителе необходимо перевести примерно половину ионов эрбия на метастабильный уровень 2. Мощность накачки оптического усилителя, при которой населенность уровней 1 и 2 равны, называется пороговой мощностью.


Рис.1.2.6. Спектральная зависимость усиления/поглощения эрбиевого волокна при разных значениях относительной населенности метастабильного уровня энергии. Нижняя (черная) кривая – населенность 0%, верхняя кривая – населенность 100%. Кривые проведены для населенностей изменяющихся с шагом 10%

При мощности накачки ниже пороговой наблюдается не усиление, а поглощение светового сигнала. На рис.1.2.6. представлены спектры поглощения/усиления при различных значениях относительной населенности уровня 2, определяемой уровнем мощности накачки. Нижняя кривая, наблюдающаяся в отсутствии накачки (все частицы находятся в основном состоянии, населенность уровня 2 равно 0%), соответствует усилению», т.е. поглощению «отрицательному BO всем рабочем спектральном диапазоне. По мере увеличения мощности накачки все большее число активных ионов переходит в возбужденное состояние. Это приводит, как видно из рис.1.2.6. сначала к уменьшению коэффициента поглощения, так называемое просветление, а затем к усилению света. спектр несколько Отметим также, что усиления сдвинут В длинноволновую область относительно спектра поглощения. Следовательно, для усиления в длинноволновой части спектра требуется меньшее значение инверсии.

Использование трехуровневой схемы накачки приводит к появлению следующих важных свойств эрбиевого усилителя:

• Наличию пороговой мощности накачки, при которой происходит «просветление» активного волоконного световода, т.е. достигаются нулевые потери. При превышении пороговой мощности накачки начинается усиление сигнала. В зависимости от структуры активного волоконного световода, концентрации легирующей примеси и длины волны накачки величина пороговой мощности составляет от долей до нескольких единиц мВт.

• Необходимости выбора оптимальной длины эрбиевого волокна, то есть длины, при которой достигается максимальное усиление при заданной концентрации ионов эрбия. При длине волокна больше оптимальной в дальних участках волокна будет наблюдаться поглощение сигнала, а при использовании эрбиевого волокна недостаточной длины излучение накачки используется не полностью. Оптимальная длина эрбиевого волокна зависит от частоты усиливаемого сигнала. Чем меньше частота сигнала, тем более длинный отрезок эрбиевого волокна соответствует максимальному усилению.

При отсутствии усиливаемого сигнала ионы эрбия переходят в основное состояние самопроизвольно, излучая фотоны с энергией, соответствующей данному переходу. То есть появляется спонтанное излучение (люминесценция).



Рис.1.3.18. Спектр излучения (а) и зависимость интенсивности излучения на 1.48 мкм от мощности накачки (б) для двухступенчатого рамановского лазера на основе фосфоросиликатного световода

1.3.3.3. Датчики физических величин на основе волоконных брэгговских решеток

В настоящее время ВБР рассматриваются как один из наиболее чувствительных перспективных элементов волоконно-оптических датчиков физических величин. К числу их основных преимуществ можно отнести: защищенность от воздействия электромагнитных полей, высокую чувствительность, надежность, воспроизводимость И широкий измерений, динамический диапазон возможность спектрального И мультиплексирования пространственного чувствительных элементов, расположенных в одном или в нескольких световодах, значительное расстояние до места проведения измерений, малое время отклика на измеряемой величины, изменение высокую коррозионную И радиационную стойкость, малые габариты и вес, и ряд других.

Как уже отмечалось, резонансная длина волны λ_{BG} зависит от температуры световода и от приложенных к нему механических растягивающих или сжимающих напряжений (1.3.3). Это обстоятельство лежит в основе использования ВБР в качестве чувствительных элементов датчиков физических величин.

На сегодняшний день предложено большое число способов измерения смещения λ_{BG} . Наиболее прямым из них является измерение спектра пропускания/отражения решетки с помощью широкополосного источника излучения и спектроанализатора либо с помощью узкополосного перестраиваемого лазера и фотоприемника. Такой способ является нечувствительным к оптическим потерям, которые могут возникать в оптическом тракте при проведении измерений, и обеспечивает высокую точность измерений λ_{BG} . Вместе с тем такая схема регистрации

79

Рис.1.3.16. Характеристики иттербиевого волоконного лазера с накачкой в оболочку:

а) спектр люминесценции иттербиевого световода (пунктирная линия) и спектр генерации (сплошная линия); б) зависимости выходной мощности лазера от мощности накачки для различных длин волн генерации

На рис.1.3.17 представлена схема двухступенчатого ВКР-лазера на основе фосфоросиликатного световода. В ЭТОМ лазере излучение иттербиевого лазера 1 (λ =1.06 мкм) с помощью двух последовательных ВКР-преобразований переводится в излучение с длиной волны 1.48 мкм. Для эффективного ВКР-преобразования использовалось два вложенных сформированные брэгговскими решетками резонатора 2, С соответствующими резонансными длинами волн. Для более эффективного использования мощности накачки на выходе лазера была расположена ВБР 3.



Рис.1.3.17. Оптическая схема двухступенчатого волоконного ВКР-лазера на основе фосфоросиликатного световода

Отметим, что в спектре излучения такого ВКР-лазера присутствует непоглощенное излучение накачки, а также линия, соответствующая промежуточному ВКР-преобразованию (λ =1.24 мкм), вместе с тем при правильной оптимизации схемы лазера интенсивность этих линий не превышает 1% от интенсивности выходного излучения (рис.1.3.18,а). Общая эффективность ВКР-лазера при накачке мощностью 5Вт на 0.98 мкм составляет $P_{1.48}/P_{0.98} \sim 22\%$ при дифференциальной квантовой эффективности около 50% (рис.1.3.18,б).



1.2.1.3. Основные элементы и характеристики эрбиевого волоконного усилителя

Характеристики волоконного эрбиевого усилителя определяются параметрами активированного ионами эрбия волокна и оптической схемой-топологией усилителя.

B большинстве усилителей схем волоконных накачка световедущей осуществляется непосредственно В торец жилы активированного волокна. В последнее время в результате разработки активированных эрбием световодов со сложным профилем показателя преломления и распределения ионов эрбия по диаметру световедущей жилы волокна начали применяться более эффективные схемы усилителей с накачкой через промежуточную оболочку световода.

В Таблице 1.2.1 приведены значения эффективностей использования определяемой накачки. максимальным значением отношения коэффициента усиления к мощности накачки, для нескольких полос поглощения. Источники накачки видимого диапазона на основе твердотельных и газовых лазеров использовались на начальном этапе исследований эрбиевых волоконных усилителей, были пока не разработаны необходимые полупроводниковые источники. Наибольшая эффективность использования накачки достигается на длинах волн 980 и 1480 мкм. Отметим, что именно этот факт дал мощный толчок развитию полупроводниковой техники высоких мощностей. Если в первых экспериментах по усилению сигнала использовались полупроводниковые лазеры с максимальной мощностью 20-30 мВт, то в настоящее время разработаны устройства накачки с мощностью в несколько сотен мВт, введенной в одномодовое волокно. Большая мощность накачки требуется, обеспечения коэффициента например. для высокого усиления одновременно большого числа информационных каналов в системах со спектральным уплотнением (DWDM).

Таблица 1.2.1. Эффективность использования накачки в эрбиевом усилителе	
Длина волны накачки, нм	Максимальная эффективность накачки,
	дБ/мВт
980	11
1480	6.3
664	3.8
532	2.0
827	1.3

На рис.1.2.7. показана простейшая схема модуля эрбиевого волоконного оптического усилителя. Модуль состоит из следующих ключевых элементов:

1) **Полупроводниковый источник накачки**, работающий на длинах волн 980 нм или 1480 нм.

2) Соединитель канала накачки на длине волны 980/1480 нм и полезного сигнала с λ = 1.54 мкм, который необходимо усиливать (в англоязычной литературе - WDM coupler).

3) Оптическое волокно, активированное эрбием. В волокне происходит оптическое усиление входного сигнала. Этот элемент является ключевым в модуле оптического усилителя.

4) Оптический изолятор, пропускающий оптические сигналы только в одном направлении. Оптический изолятор предотвращает попадание отраженного сигнала от оптических элементов, стоящих за ним (например, брэгговской решетки), в активное волокно и полупроводниковый источник накачки.

5) Брэгговская решетка, выравнивающая спектр усиления в рабочем диапазоне длин волн.



Рис.1.2.7. Модуль оптического волоконного усилителя на основе эрбиевого волокна: a) обозначение на схеме, б) оптические компоненты, входящие в модуль, в) фотография внутренней компоновки реального волоконного усилителя

Ниже приводятся основные параметры коммерчески доступных эрбиевых волоконных усилителей:

- коэффициент линейного усиления (малосигнального) – 30-40 дБ;

- мощность насыщения до 0,5 Вт;
- спектральная полоса усиления $\Delta \lambda = 30-40$ нм;
- диапазон рабочих (усиливаемых) длин волн 1530-1570 нм;

Волоконные ВКР-лазеры позволяют получать мощную (P>1 Вт) непрерывную генерацию в широком диапазоне длин волн от 1.1 до 1.7 мкм. Для создания эффективных волоконных ВКР-лазеров используются как стандартные, так и специальные световоды. Несмотря на то, что $\sim 10^{-13}$ ВКР усиления в стекле составляет g_R м/Вт. коэффициент создания эффективных лазеров определяется низкими возможность потерями, большой длиной взаимодействия и высокой плотностью излучения накачки *P*~1 ГВт/см². В германосиликатных мощности световодах максимум полосы комбинационного рассеяния находится на 440-460 см⁻¹, в то время как в световодах на основе фосфоросиликатного стекла присутствует интенсивная дополнительная полоса на частоте ~1330 см⁻¹. Наличие этой полосы в фосфоросиликатных световодах позволяет сократить количество ВКР-преобразований в три раза для того чтобы достичь определенной длины волны выходного излучения. Так, например, для получения генерации на длине волны 1480 нм (длина волны накачки эрбиевых усилителей) при накачке излучением иттербиевого волоконного лазера в фосфоросиликатных световодах достаточно двухступенчатой схемы, в то время как для германосиликатных световодов необходимо 5-6 ступеней преобразования.



Типичная структура волоконного световода с двойной оболочкой представлена на рис.1.3.15. Он состоит из трех слоев: одномодовой сердцевины 1, легированной как активной примесью редкоземельного элемента, так и примесями, формирующими профиль ПП; внутренней кварцевой оболочки 2; внешней полимерной оболочки 3 с ПП, пониженным по сравнению с ПП кварцевого стекла. Внутренняя кварцевая оболочка имеет типичный размер 0.1 - 1 мм, что обеспечивает возможность ввода излучения накачки от полупроводниковых источников с мощностью несколько десятков ватт. При распространении по кварцевой оболочке излучение накачки поглощается активными ионами редкоземельного элемента, вызывая люминесценцию, которая при наличии резонатора, сформированного ВБР 4, развивается в лазерную генерацию, локализованную в сердцевине световода, диаметр которой составляет 5-10 мкм. Для более эффективного поглощения накачки кварцевая оболочка, как правило, имеет прямоугольное или Δ -образное поперечное сечение.



Рис.1.3.15. Схема волоконного лазера на основе активного световода с двойной оболочкой

Типичные характеристики иттербиевого волоконного лазера на основе световода с двойной оболочкой иллюстрирует рис.1.3.16. На нем представлены спектр люминесценции световода, а также спектр генерации лазера, возникающей при стыковке световода с парой согласованных решеток, имеющих резонансную длину волны 1103 нм (рис.1.3.16,а). В данном случае ВБР с высоким коэффициентом отражения (R > 99%) имела спектральную ширину 0.7 нм, а выходная ВБР ($R \sim 10\%$) - 0.3 нм. Благодаря широкой полосе люминесценции иттербиевые световоды позволяют получать лазерную генерацию в широком диапазоне длин волн 1050 - 1150 нм с дифференциальной эффективностью 50-80%. Зависимости выходной мощности лазера от мощности накачки на 978 нм для разных длин волн генерации представлены на рис.1.3.16,6. Видно, в частности, что при удалении от максимума спектра люминесценции (1.08-1.09 мкм) эффективность генерации уменьшается, однако остается на уровне 50% даже на длине волны 1148 нм.

Уже сейчас на основе световодов с двойной оболочкой разработаны лазерные системы, имеющие выходную мощность ~1 кВт. Такие системы применяются для обработки различных материалов, а также в качестве источников накачки для волоконных лазеров, использующих явление вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР-лазеры).

- коэффициент шума - 4-6 дБ.

Ширина и равномерность полосы усиления

Ширину полосы усиления можно определять разными способами. В любом случае этот параметр должен давать информацию о том, что в определенном диапазоне длин волн значение усиления не ниже некоторого граничного уровня. Как правило, этот уровень составляет 3 дБ от максимального значения коэффициента усиления. Для многоканальных волоконно-оптических систем со спектральным мультиплексированием этот параметр является принципиальным. Поскольку в настоящее время число каналов достигает 100 и практически трудно реализовать разделение отдельных спектральных каналов с интервалами менее чем 0,4 нм (100 ГГц), то ширина спектра усиливаемого излучения может превышать 40 нм. условиях ширина полосы В этих усиления начинает оказывать определяющее влияние на число спектральных каналов, используемых для передачи информации, a значит, и на общую информационную пропускную способность волокна. Вообще говоря, ширина полосы усиления определяется спектром излучения ионов эрбия в материале сердцевины оптического волокна. Определяющее влияние материала сердцевины волокна на спектр излучения связан с тем, что ионы эрбия этого материала. Под действием молекулами окружены молекул окружения уровни энергии ионов эрбия расщепляются на подуровни (рис.1.2.4). Величина расщепления и определяет ширину полосы излучения. Чем шире полоса излучения, тем более широкого спектра усиления можно добиться при конструировании усилителя. Наиболее широким спектром излучения обладают ионы эрбия в алюмосиликатном стекле (рис.1.2.8). Спектры усиления типичного эрбиевого усилителя на алюмосиликатном стекле при двух значениях мощности входного сигнала представлены на рис.1.2.9. Увеличивая длину активного волокна, удается получать достаточно большой коэффициент усиления вплоть до длины волны 1560 нм, при превышении которой усиление резко спадает. Таким образом, ширина полосы усиления для традиционной конфигурации усилителя (рис.1.2.7) составляет примерно 30 нм (1530 – 1560 нм). Эта полоса усиления имеет название стандартного диапазона (conventional band). или С-диапазона. Как видно из рис.1.2.8, интенсивность люминесценции имеет заметное значение вплоть до 1600 нм. При этом поглощение в области 1560 – 1600 нм падает очень быстро, что позволяет использовать и этот диапазон для усиления световых сигналов. Таким усиление возможным образом, оказывается В так называемом длинноволновом диапазоне (long wavelength band) или L-диапазоне, если использовать длинное эрбиевое волокно. Следует отметить, что при такой конструкции усилителя активная среда оказывается не полностью инвертированной, и для оптических сигналов в С-диапазона такое устройство работает как поглотитель. Поэтому перед усилением

оптические сигналы разделяются по диапазонам С и L, и для каждого используется свой усилитель. Спектральные характеристики усиления в обоих диапазонах представлены на рис.1.2.10. Дальнейшее расширение рабочего спектрального диапазона эрбиевых усилителей связано с использованием области 1480–1530 нм, или S-диапазона (short wavelength band – коротковолновый диапазон). Интенсивность люминесценции ионов эрбия в этой области не меньше, чем в *L*-диапазоне, однако существенным является сильное поглощение сигнала (рис.1.2.5, кривая 1). Эта проблема более мощных источников накачки решается использованием по сравнению с другими усилителями. Вторая проблема выглядит более серьезной и связана она с сильной конкуренцией между усилением сигнала в S- диапазоне и спонтанным излучением в C-диапазоне, для которого условия усиления являются более благоприятными. В последнее время опубликованы несколько работ, в которых показана возможность усиления в S-диапазоне при использовании фильтров или введении изгибных потерь в диапазоне 1530 – 1560 нм для подавления усиленного спонтанного излучения.



Рис.1.2.8. Спектры излучения ионов эрбия в кварцевом стекле с различными добавками

продольной моды лазера, длина волны которой находится в контуре отражения решетки (рис.1.3.14). Чтобы исключить влияние собственного резонатора лазера, на его выходную грань может быть нанесено просветляющее покрытие.





В зависимости от параметров решетки и расстояния между ней и лазерным кристаллом возможно создание одночастотного или многочастотного режимов лазерной генерации. Так как температурная чувствительность λ_{BG} примерно на порядок ниже, чем чувствительность длины волны диодных лазеров, такая конфигурация позволяет в ряде применений обойтись без температурной стабилизации лазера. Описанная схема стабилизации излучения полупроводниковых лазеров применяется для создания одномодовых лазеров накачки, а также источников излучения для систем связи со спектральным уплотнением каналов (как альтернатива лазерам с распределенной обратной связью).

ВБР широко используются для формирования резонаторов волоконных лазеров, активной средой которых служат волоконные световоды, легированные ионами редкоземельных элементов, таких как эрбий, неодим, иттербий, тулий и гольмий (см. раздел 1.1). Решетки при этом могут быть записаны непосредственно в активном световоде.

Одномодовые волоконные лазеры с узкой линией генерации и относительно небольшой выходной мощностью (~10 мВт) находят применение для использования в лазерной спектроскопии, датчиках физических величин и др. Среди схем таких лазеров можно выделить:

- лазер с относительно коротким резонатором (несколько сантиметров), сформированным двумя однородными ВБР;

- лазер на основе ВБР с фазовым сдвигом $\pi/2$.

В последние годы активные исследования проводятся в области создания мощных волоконных лазеров с использованием волоконных световодов с двойной оболочной (double-clad fiber). Значительный прогресс в этом направлении обусловлен, прежде всего, разработкой мощных и надежных полупроводниковых источников накачки, а также разработкой качественных световодов с двойной оболочкой.

кривой усиления менее 1 дБ при коэффициенте усиления более 30 дБ в спектральной полосе 35 нм. В настоящее время использование спектральных фильтров позволяет получать неравномерность коэффициента в той же спектральной полосе на уровне 0.1 дБ и лучше.



Рис.1.3.12. Спектр усиления волоконного эрбиевого усилителя: исходный (1), выровненный с использованием ДПВР (2)

1.3.3.2. Применение волоконных брэгговских решеток в схемах диодных и волоконных лазеров

В настоящее время ВБР нашли ряд важных применений в схемах полупроводниковых и волоконных лазеров. Использование решеток позволяет гибко варьировать длину волны лазерной генерации в пределах контура усиления активной среды лазера, обеспечить стабильность генерации, в ряде случаев уменьшить ширину лазерной линии, реализовать ее перестройку и др.



Рис.1.3.13. Схема стабилизации излучения полупроводниковых диодных лазеров с помощью волоконной брэгговской решетки: 1 - диодный лазер, 2 - волоконный световод, 3 - ВБР

На рис.1.3.13 показана одна из возможных схем использования ВБР с диодными лазерами. Излучение лазера 1 с помощью линзы, сформированной на торце световода 2, вводится в его сердцевину. Брэгговская решетка 3, записанная в световоде, формирует обратную связь на резонансной длине волны λ_{BG} . В частности, ВБР может играть роль зеркала внешнего резонатора, что обеспечивает генерацию одной



Рис.1.2.9. Спектральные зависимости коэффициентов шума (NF) и усиления (G) эрбиевого усилителя для двух значений входного сигнала

Современные эрбиевые волоконные усилители обеспечивают усиление модулированных оптических сигналов в полосе до 40 ГГц. Имеются экспериментальные работы, в которых показана возможность усиления модулированных сигналов с скоростями модуляции до 160 Гбит/с.



Рис.1.2.10. Спектральные характеристики двухдиапазонного усилителя

Полоса пропускания, ее равномерность, динамический диапазон и другие перечисленные выше характеристики усилителя напрямую зависят активированного ОТ параметров световода (его длины, диаметра световедущей эрбия жилы, распределения ионов ПО диаметру световедущей жилы, степени однородности накачки и т.д.), а также топологии усилителя. В связи с тем, что невозможно создать усилители с одним активным элементом (световодом), полностью удовлетворяющие

требования *DWDM*-систем, в последнее время стали разрабатываться многокаскадные эрбиевые волоконно-оптические усилители. Так, фирма *Lucent Technologies* сообщила о создании двухкаскадных эрбиевых волоконных усилителей, имеющих спектральную полосу усиления $\Delta \lambda = 35$ нм с максимальным отклонением коэффициента усиления не более 0,6 дБ (или 2,5%) в пределах всей полосы. Современная технология изготовления активированных эрбиевых световодов позволяет сдвигать границы полосы усиления в пределах длин волн $\Delta \lambda = 1530-1650$ нм, перекрывая тем самым *С* и *L* полосы DWDM-систем. Фирмой *Alcatel* разработан эрбиевый волоконный усилитель для DWDM-систем, работающий в *L* спектральной полосе ($\Delta \lambda = 1570-1603$ нм) и имеющий среднее значение коэффициента усиления, равное 34 дБ с отклонением не более 1,8 дБ по всей полосе усиления. При мощности накачки, равной 1,76 Вт, выходная мощность усилителя составляла +26 дБм.

Последним достижением можно считать разработку эрбиевых усилителей на основе теллуритного волокна, имеющих спектральную полосу $\Delta \lambda = 80$ нм, которая перекрывает *C* и *L* рабочие полосы DWDM систем. Именно с помощью таких усилителей была реализована экспериментальная система, обеспечивающая полную скорость передачи информации 3 Тбит/с (19 спектральных каналов емкостью 160 Гбит/с в каждом канале).

Кроме широкой усиления полосы важную роль играет равномерность коэффициента усиления во всей полосе или плоскостность (рис.1.2.11). спектральной характеристики Это обусловлено необходимостью иметь одинаковое усиление сигнала В каждом спектральном канале. Как правило, ни один из усилителей не имеет плоской спектральной характеристики, поэтому выравнивание спектра усиления осуществляется оптическими фильтрами различных типов, например, при использовании брэгговских рещеток (рис.1.2.12) или за счет использования активированного волокна специального состава (фторидного - рис.1.2.13 или теллуритного). В основном усилители, системах co спектральном уплотнением, применяемые В имеют неравномерность коэффициента усиления в пределах не более нескольких децибел во всей полосе усиления.

спектральными компонентами импульса и таким образом восстанавливать его исходную форму. Как правило, для компенсации дисперсии требуются решетки большой длины, которые записываются через фазовую маску. В настоящее время уже получены качественные решетки с длиной более 1 метра. Достигнутая величина дисперсии в решетках с переменным периодом более 1000 пс/нм позволяет компенсировать дисперсию 50-км отрезка стандартной волоконно-оптической линии на длине волны 1.55 мкм.



Рис.1.3.11. Оптическая схема компенсатора дисперсии, построенного на основе волоконной брэгговской решетки с переменным периодом

информации на большие расстояния помимо Для передачи компенсации дисперсионного уширения импульсов нужно время от времени усиливать оптический сигнал, который ослабляется, несмотря на то, что современные волоконные световоды имеют весьма низкие оптические потери (~0.2-0.3 дБ/км). Как правило, через каждые 50-100 км линии связи для усиления сигнала используются эрбиевые волоконные усилители для линий в диапазоне 1.55 мкм (см. раздел 1.1). Ясно, что для одновременного усиления нескольких оптических каналов усилитель должен иметь не слишком большие вариации коэффициента усиления по длине волны, то есть иметь близкий к постоянному коэффициент усиления в используемом спектральном диапазоне (как правило, вариации этой величины не должны превышать нескольких десятых децибела). К сожалению, эрбиевые усилители имеют значительные спектральные вариации коэффициента усиления, которые, вообще говоря, зависят от многих факторов, таких как концентрация ионов эрбия и его локальное окружение, длина волны и интенсивность оптической накачки, длина самого световода и др. Использование волоконных решеток позволяет модифицировать спектр усиления, сделав его более гладким, или исправить нежелательные спектральные искажения, возникшие после усиления сигналов. Отметим, что для выравнивания спектра усиления могут использоваться ВБР с перпендикулярными либо наклонными по отношении к оси световода штрихами, а также длиннопериодные волоконные решетки.

Для иллюстрации на рис.1.3.12 представлены результаты одной из первых работ, в которой однородная ДПВР была применена для выравнивания спектра усиления эрбиевого усилителя. Была получена неравномерность работы оптических усилителей. В связи с этим отметим наиболее важные приложения волоконных решеток ПП в работе описанных систем.

Очевидно, что для успешной работы таких линий связи требуются устройства ввода/вывода отдельных спектральных каналов, которые могут быть успешно реализованы на основе ВБР. Одна из возможных схем такого селектора оптического канала с длиной волны λ_N , построенная на основе брэгговской решетки с высоким коэффициентом отражения и двух оптических циркуляторов, приведена на рис.1.3.10.



Рис.1.3.10. Оптическая схема устройства для ввода/вывода заданного спектрального канала в волоконно-оптической линии связи

Факторами, ограничивающими применение волоконных брэгговских решеток в этом случае, являются боковые максимумы в спектре решетки (см. рис. 1.3.3), а также оптические потери, вызванные возбуждением мод оболочки на структуре решетки. Для подавления боковых резонансов ВБР было предложено изменять амплитуду модуляции ПП в решетке по ее длине. Наилучшие спектральные характеристики имеют решетки со сглаженным по определенному закону профилем модуляции наведенного ПП при постоянном его среднем значении по длине решетки. Для подавления возбуждения оболочечных мод на ВБР был также предложен ряд подходов.

Еше фактором, ограничивающим ОДНИМ скорость передачи информации в современных линиях связи, является хроматическая дисперсия волоконных световодов. Дело в том, что при распространении в среде лазерные импульсы, несущие информацию, диспергирующей уширяются и начинают перекрываться друг с другом. В стандартных волоконных световодах на длине волны 1.55 мкм величина дисперсии групповых скоростей составляет около 17 пс/(нм км), поэтому, несмотря на низкие потери стандартных световодов (~0.2 дБ/км) при скорости передачи 40 Гбит/с расстояние, на которое можно передать информацию, не превышает 10 км. Для того, чтобы увеличить это расстояние при использовании уже использующихся волоконных световодов, необходимо компенсировать их дисперсию.

Это может быть сделано с использованием компактного волоконного элемента, каким является ВБР с переменным периодом (рис.1.3.11). Такая решетка способна вносить определенную временную задержку между



Рис.1.2.11. Спектр усиления-потерь Er усилителя при разных накачках (а) и участок спектра (*C*-band), который использован для передачи 16 спектральных каналов с WDM-разделением ID =1.25 нм



Рис.1.2.12. Фрагмент спектра усиления в эрбиевом волокне до (а) и после (в) брэгговской решетки, которая имеет спектр пропускания(б), зеркально повторяющий контур усиления



Рис.1.2.13. Фрагмент спектра усиления 16 сигналов в эрбиевом силикатном (а) и фторидном (б) волокне

1.2.1.4. Преимущества и недостатки эрбиевых волоконных усилителей

Преимущества:

- высокая передача энергии от накачки к сигналу >50%;
- одновременное усиление в широком диапазоне длин волн в области 1550 нм с выходной мощностью в 37дБ/м, с относительно плоским спектром усиления >20дБ, т.е. подходит для WDM-систем;
- выходной предел более 1мВ (10-25дБ/м);
- временная константа усиления (>100мс) достаточно велика для преодоления помех модуляции;
- низкий шум-фактор;
- поляризационно-независим (что уменьшает потери на соединениях);
- пригодны для использования в дистанционных системах;
- эрбиевый усилитель также может работать в *S* и *L*-band диапазонах.

Недостатки:

- большие размеры модуля эрбиевого усилителя (~220×220×10 мм³). Габариты корпуса усилителя определяются радиусом изгиба активированного оптического волокна, который составляет более 10 см. Это приводит к нерациональному соотношению веса активированного оптического волокна (несколько грамм) к объему, который оно занимает в корпусе усилителя;
- невозможность интеграции с полупроводниковыми устройствами;
- в эрбиевом усилителе существует усиленное спонтанное излучение (amplified spontaneous emission ASE). Поэтому даже если нет входящего сигнала, всегда существует какой-то сигнал на выходе усилителя вследствие спонтанного перехода некоторых ионов в возбужденное состояние. Этот эффект называется спонтанным шумом.
- перекрестные помехи;
- предел усиления.

1.2.1.5. Рамановский волоконный усилитель

В основе функционирования рамановских усилителей лежит явление вынужденного комбинационного рассеяния. При этом усиление

типа IIa, начальный рост коэффициента отражения сопровождается его уменьшением и последующим новым ростом. Вместе с тем, в отличие от типа IIa, резонансная длина волны с дозой УФ-облучения сдвигается в длинноволновую область на очень большую величину 15-20 нм, что соответствует изменению среднего ПП в сердцевине $\sim 2 \cdot 10^{-2}$. Примечательно, что амплитуда модуляции наведенного ПП в решетке на 2 порядка ниже указанной величины. Такой тип фоточувствительности был назван типом Ia.

Интересной особенностью решеток этого типа является меньшая (на 30%) температурная чувствительность в сравнении с решетками типа I и IIa.

1.3.3. Применения волоконных решеток

Фотоиндуцированные волоконные решетки показателя преломления находят широкое применение в различных устройствах волоконной оптики. Прежде всего, следует выделить использование решеток в качестве спектрально-селективных элементов в системах волоконнооптической связи, в различных типах волоконных лазеров и усилителей, а также в системах измерения физических величин.

1.3.3.1. Применение волоконных решеток в системах волоконнооптической связи

Постоянно растущая потребность в увеличении скорости передачи связанная информации, С развитием средств телекоммуникаций, увеличением информационных потоков, ростом глобальных информационных систем и баз данных, расширением числа пользователей, волоконно-оптические привела TOMY, что линии связи стали К разрабатываться с применением спектрального мультиплексирования оптических каналов (DWDM). В настоящее время уже разработаны соответствующие стандарты линий связи, устанавливающие интервал между соседними каналами 50 ГГц (около 0.4 нм в спектральном диапазоне вблизи 1.5 мкм). В экспериментальных линиях связи скорость передачи по одному каналу составляет 40 Гбит/с, в то время как общее их число достигает 200. Общая скорость передачи информации в такой линии связи составляет 8 Тбит/с, что является чрезвычайно большой величиной. Достаточно сказать, что все содержимое современного жесткого диска емкостью 100 Гбайт при такой скорости передачи информации будет передано всего за 100 миллисекунд. Естественно, что такой значительный прогресс основывается на постоянном совершенствовании систем волоконной оптики и их элементной базы. В частности, успешно осваиваются высокоскоростные системы передачи и приема информации, расширяются полосы пропускания световодов и спектральные диапазоны

Отметим также, что решетки типа IIa имеют существенно более высокую температуру отжига в сравнении с решетками типа I (500-600°С).

Решетки типа II

Значительное изменение постоянной распространения моды сердцевины волоконного световода может быть реализовано путем его облучения лишь одним импульсом эксимерного лазера, если плотность энергии в импульсе около 1 Дж/см². В результате воздействия такого мощного импульса возникает интенсивный прогрев сердцевины световода, сопровождающийся частичным плавлением граничной с сердцевиной области оболочки. Решетки, записанные в таком режиме, принято называть решетками типа II. Недостатком решеток типа II является то, что процесс записи весьма трудно контролировать, особенно если учесть, что энергия в импульсе эксимерного лазера, как правило, не слишком стабильна от импульса к импульсу. Кроме того, асимметрия наведенного изменения свойств стекла в области сердцевины приводит к эффективному возбуждению оболочечных мод, что сопровождается значительными потерями с коротковолновой стороны от основного резонанса. К этому облучении световода столь добавить, что при большими стоит плотностями оптической мощности (~10⁸ Bt/см²) в ряде случаев происходит частичное повреждение поверхности световода, что резко снижает его механическую прочность. Эти обстоятельства не позволили широко использовать решетки типа II для практических целей.

Решетки, записанные в световодах, подвергнутых водородной обработке

решеток, индуцированных При рассмотрении В световодах, подвергнутых водородной обработке, по-видимому, следует говорить о самостоятельном типе фоточувствительности. Под действием УΦоблучения молекулярный водород встраивается В сетку германосиликатного стекла как в областях структурных дефектов, так и с разрывом регулярных связей. Этот процесс сопровождается образование структурных групп *Si-OH*, *Ge-OH*, *Ge-H* и *H*₂*O*.

Дозовая зависимость при записи решеток с водородом в световодах с низкой концентрацией германия напоминает степенную зависимость, наблюдающуюся для решеток типа I, однако абсолютная величина наведенного ПП при этом обычно на порядок выше. Как уже упоминалось, решетки, записанные в световодах с водородом, имеют относительно низкую температурную стойкость.

Решетки типа Іа

В присутствии молекулярного водорода в световодах, легированных одновременно германием и бором, возникает еще один тип фоточувствительности, характеризующийся сложной динамикой коэффициента отражения и резонансной длины волны. Как и в решетках

оптического сигнала происходит в том случае, если он распространяется в световоде вместе с интенсивной волной накачки, а его длина волны лежит в полосе частот комбинационного рассеяния света в световоде.

Рамановские усилители перспективны для применения в волоконнооптических системах связи в силу их следующих принципиальных преимуществ:

1- они могут усиливать на любой длине волны;

2- в качестве активной среды рамановских усилителей может использоваться сам волоконный световод;

3- спектр усиления этих усилителей зависит от спектра (длины волны) накачки, поэтому, в принципе, подбором источников накачки можно формировать очень 4- широкую (более 100 нм) полосу усиления (рис.1.2.9);

5- рамановские усилители имеют низкий уровень шумов.

Основным недостатком рамановских усилителей является их невысокая эффективность преобразования, что требует использования довольно мощного непрерывного излучения накачки (~1 Вт) для получения типичной для оптических систем связи величины усиления сигнала 30 дБ.

Однако в последнее время в литературе появились сообщения о разработке эффективных рамановских волоконных усилителей, в которых в качестве активного световода используются специальные волоконные световоды с большим содержанием германия, обладающие низкими оптическими потерями. Этот факт, а также разработка высокоэффективных рамановских лазеров для накачки усилителя будут играть всё возрастающую роль в волоконно-оптических системах связи.

Перспективным направлением является также разработка и создание гибридных волоконных усилителей, состоящих из различных комбинаций, включающих распределенный рамановский усилитель и эрбиевый волоконный усилитель. Разработка данных схем гибридных усилителей позволила получить равномерное усиление сигналов в полосе 82,8 нм с отклонением не более 3 дБ в пределах заданной полосы.

Указанные выше достижения в области оптических усилителей позволили всем основным крупным телекоммуникационным фирмам приступить к разработке и практической реализации мультиплексорных систем связи со скоростными пределами информации 1 Тбит/с и выше.

1.2.1.6. Материалы для эрбиевых волоконных усилителей

Собственно усилительной средой усилителя является эрбиевое волокно – волоконный световод с примесями ионов эрбия. Изготавливаются такие световоды теми же методами, что и световоды для передачи информации, с добавлением промежуточной операции пропитки

не проплавленного материала сердцевины раствором солей эрбия либо операции легирования ионами эрбия из газовой фазы непосредственно в процессе осаждения сердцевины (см. раздел 1.2.1.6). Волноводные параметры эрбиевого волоконного световода делают сходными с параметрами световодов, используемых для передачи информации, в целях уменьшения потерь на соединения. Принципиальным является выбор легирующих добавок, формирующих сердцевину активного световода, а также подбор концентрации ионов эрбия. Различные добавки в кварцевое стекло изменяют характер штарковского расщепления уровней энергии ионов эрбия (рис.1.2.4). В свою очередь это приводит к изменению спектров поглощения и излучения. На рис.1.2.8. представлены спектры излучения кварцевом легированном ионов эрбия В стекле, наиболее часто применяемыми в технологии волоконных световодов добавками германия, фосфора и алюминия. Из представленных данных видно, что наиболее люминесценции (a значит, широкий спектр И спектр усиления), составляющий около 40 нм по полувысоте, достигается при использовании в качестве добавки алюминия. Поэтому этот элемент стал необходимой составляющей материала сердцевины эрбиевых волоконных световодов.

Концентрация ионов эрбия в сердцевине оптического волокна фактически определяет его длину, используемую в усилителе при заданных уровнях сигнала и накачки. Верхний предел концентрации активных ионов определяется возникновением эффекта кооперативной ап-конверсии. Это явление состоит в том, что при большой концентрации активных ионов возможно образование кластеров, состоящих из двух и более ионов эрбия. Когда эти ионы оказываются в возбужденном состоянии, происходит обмен энергиями, в результате чего один из них переходит в состояние с еще более высокой энергией, а второй - безызлучательно релаксирует на основной уровень. Таким образом, часть ионов эрбия поглощает излучение усиленного сигнала, снижая эффективность усилителя.

Другое направление исследований в области расширения полосы усиления эрбиевых усилителей, а также увеличения концентрации ионов эрбия связано с поиском других (не силикатных) стеклообразующих матриц для сердцевины волокна. Так в последнее время появился значительный интерес к фосфатным, теллуритным и фторидным стеклам.

Ширина спектра люминесценции у фосфатных стекол близка к силикатным (рис.1.2.14). Здесь выигрыша у этих материалов по сравнению с силикатными матрицами нет. Тем не менее, увеличение концентрации эрбия в фосфатных стеклах не приводит к заметному образованию эрбиевых кластеров, как это имеет место в силикатных стеклах. Поэтому фосфатные стекла имеют более низкие коэффициенты нелинейного ап-конверсионного тушения люминесценции по сравнению с силикатными стеклами. Это позволяет реализовывать в фосфатных стеклах более высокие концентрации ионов эрбия без заметного концентрационного тушения, по сравнению с силикатными стеклами. Однако, на сегодняшний

28



Рис.1.3.9. Зависимости амплитуды модуляции наведенного показателя преломления от дозы облучения для волоконных брэгговских решеток, записанных в световодах с концентрацией диоксида германия 12 мол.% (1) и 35 мол.% (2)

Решетки типа Па

При записи ВБР в световодах с высокой концентрацией германия (20 мол.% и более) после начального роста амплитуды модуляции наведенного ПП (коэффициента отражения) в первом порядке решетки ее величина снижается практически до нулевого значения, а затем возрастает вновь, в дальнейшем стремясь к насыщению (рис.1.3.9, кривая 2). Анализ динамики коэффициента отражения во втором порядке решетки, а также сдвиг резонансной длины волны в процессе записи позволяют предположить, что роста решетки второй фазе наведенный ΠП В BO максимумах интерференционной картины УФ-излучения становится отрицательным. Явление уменьшения индуцированного ПП при УФ-облучении называют фоточувствительностью типа IIa, а решетки, которые записаны в области второго возрастания коэффициента отражения, решетками типа Па.

В настоящее время хорошо известно, что образование решеток типа IIa тесно связано с изменением упругих напряжений в сетке германосиликатного стекла, происходящим при УФ-облучении. Об этом свидетельствует, например, тот факт, что формирование решетки типа Па значительно ускоряется, если к световоду во время записи ВБР приложено растягивающее напряжение. Формирование решеток типа IIa наблюдается в объемных образцах, где решетки записываются в тонком слое вблизи свободной поверхности образца, поэтому структура и величина упругих напряжений могут быть другими. Также было показано, что образование решетки типа Па сопровождается заметной релаксацией напряжений в области сердцевины световода, из чего был сделан вывод о возникающем разрежении сетки кварцевого стекла.

Примечательно, что низкотемпературная водородная обработка приводит к полному исчезновению типа Па и формирование этого типа вновь наблюдается после выхода молекулярного водорода из сетки стекла. Недостатки этого способа увеличения фоточувствительности заключаются в том, что приложенные деформации имеют довольно большую величину (3% и более), что требует высокого качества поверхности световода и механической стабильности системы растяжения при записи. Кроме того, такие деформации значительно изменяют резонансную длину волны решетки, поэтому они должны быть учтены и заданы с высокой точностью, чтобы решетка после освобождения от механической нагрузки имела нужную длину волны.

1.3.2.6. Типы фоточувствительности в германосиликатных световодах

Физические явления, происходящие при облучении кварцевых стекол УФ-излучением, весьма многообразны. Имеющиеся в настоящее время экспериментальные факты не удается описать в рамках единой модели. Дело в том, что в процесс изменения ПП кварцевого стекла вносят вклад несколько механизмов, действие которых происходит одновременно, что затрудняет анализ и осмысление результатов. Вместе с тем известно, что значительный вклад в изменение ПП в сердцевине германосиликатных световодов вносит фотоиндуцированная трансформация ГКДЦ, которая приводит к образованию новых дефектных центров, а также к деформации сетки, проявляющейся в увеличении плотности стекла и изменении его спектров комбинационного рассеяния. Такие деформации сопровождаются ростом упругих напряжений в сердцевине световода.

В настоящее время известно несколько типов фоточувствительности германосиликатных световодов. Эти типы проявляются при различных условиях облучения световодов и отличаются друг от друга по динамике записи, отжига и другим свойствам фотоиндуцированных решеток.

Решетки типа І

При концентрации германия в сердцевине менее 20 мол.% (в том числе в стандартных телекоммуникационных световодах) реализуется так называемый тип I, который характеризуется монотонным возрастанием ПП при увеличении дозы УФ-облучения (рис.1.3.9, кривая 1). Этот тип характеризуется степенной зависимостью наведенного ПП от дозы облучения (D): $\Delta n_{ind} \sim D^b$, причем показатель степени b, как правило, находится в диапазоне 0.3 - 0.5. Решетки типа I имеют относительно невысокую температурную стойкость. ИХ заметная деградация наблюдается при температурах 200-300°С. Несмотря на это, решетки типа I наиболее часто используются на практике, так как относительно просто записываются в распространенных волоконных световодах. Считается, что основную роль в формировании решеток типа I играет индуцированная УФ-излучением трансформация дефектных центров германосиликатного стекла и связанное с ней уплотнение сетки.

день технология вытяжки оптических волокон из фосфатных стекол пока еще не совершенна, что сдерживает их использование для эрбиевых волоконных усилителей. Высококонцентрированные фосфатные стекла, легированные эрбием и иттербием, нашли свое применение при разработке планарных волноводных усилителей.



Рис.1.2.14. Спектры поглощения (а) и люминесценции (б) силикатного (кривая 1), фосфатного (кривая 2) и теллуритного (кривая 3) стекла, легированного ионами эрбия Ионы эрбия в теллуритных и фторидных стеклах имеют самые широкие полосы люминесценции и, соответственно усиления. Следующие два рисунка иллюстрируют эту особенность. На рис.1.2.14

показаны спектры поглощения (а) и люминесценции (б) ионов эрбия для силикатных, фосфатных и теллуритных стекол. Сравнение спектров усиления силикатного стекла, легированного алюминием, и фторидного стекла показано на рис.1.2.13. Несмотря на привлекательность теллуритных и фторидных матриц, они пока не находят широкого использования в волоконных оптических усилителях в виду сложной технологии вытяжки волокна.

1.2.2. Волоконные лазеры: материалы, технологии и применение

1.2.3.1. Общая характеристика волоконных лазеров

Впервые твердотельный лазер на рубине был реализован Мейманом в 1960 году, а спустя три года в 1963 г. Коестер и Снитцер продемонстрировали первый волоконный лазер, в котором в качестве активного элемента использовался стеклянный волоконный световод, легированный ионами неодима. Накачка первых волоконных лазеров осуществлялась через боковую поверхность световода с помощью лампы вспышки. Следующим этапом на пути совершенствования волоконных лазеров на активных ионах был новый метод накачки волоконных лазеров - ввод излучения накачки через торец волоконного световода, впервые предложенный Стоуном и Баррусом в 1973. Кроме того, постоянно совершенствовалась технология производства волоконных световодов снижались оптические потери и росли концентрации активных ионов. Бурное развитие волоконных лазеров на активных ионах было в сильной степени инициировано изобретением в 1985 г. Пэйном и его группой эрбиевого усилителя, который произвел настоящий прорыв в области волоконно-оптической связи. Постоянно растущие потребности телекоммуникационной отрасли требовали совершенствования таких важных компонентов волоконных лазеров, как: активных световодов, лазерных диодов для накачки и волоконных брэгговских решеток, возможность записи которых в волоконных световодах была впервые случайно обнаружена в 1978 г. Вслед за эрбиевыми усилителями стали развиваться волоконные лазеры и усилители на основе ионов редких земель: Yb, Tm, Ho, и др., а так же ВКР лазеры и усилители. Именно на элементной базе, разработанной для нужд оптоволоконной связи, впоследствии стали создаваться мощные волоконные лазеры. Впервые лазерная генерация на ионах Yb³⁺ в кварцевом стекле была получена еще в 1962 г. Однако долгое время лазеры на ионах Yb3+ практически не были распространены, а значительно большее распространение получили неодимовые лазеры, что связано с возможностью получения в ионах неодима генерации по чисто четырехуровневой схеме, в отличие от трехуровневой для эрбия или квази-четырехуровневой генерации для иттербия. Широкое распространение лазеры на ионах Yb получили только

своему исходному значению, поэтому световод после водородной обработки следует хранить при пониженной температуре. Так, при $T = -20^{\circ}$ С уменьшение концентрации водорода на оси световода в два раза происходит примерно через 2 месяца.

Описанный способ водородной обработки наиболее удобен для практического использования и позволяет индуцировать наведенный ПП в стандартных световодах, достаточный для большинства приложений (~10⁻²). Вместе с тем этот способ также имеет ряд недостатков. В частности, температурная стойкость решеток, записанных в световодах с водородом, оказывается низкой, в связи с чем требуется дополнительный отжиг решеток перед их использованием. Следует учитывать и тот факт, что водород, растворенный в стекле, изменяет его ПП, что приводит к некоторому смещению резонансных длин волн решеток. Величина этого смещения зависит от исходной концентрации водорода и может достигать нескольких нанометров для брэгговских решеток.

Кроме перечисленных сложностей, которые возникают при записи решеток ПП с использованием водорода, следует отметить, что при УФоблучении образуются *ОН*-группы, дающие поглощение в ИК-области спектра. Величина поглощения на длине волны 1.4 мкм может достигать нескольких дБ/см. Для того, чтобы избежать возникновения этого поглощения, вместо водорода используют дейтерий, который имеет большую атомную массу, в связи с чем полосы наведенного поглощения значительно смещены в длинноволновую область.

Полезное развитие описанной техники низкотемпературной водородной обработки было предложено в работе, где было показано, что облучение световода с растворенным водородом небольшой дозой УФизлучения позволяет «заморозить» высокую фоточувствительность световода, то есть сохранить ее в течение длительного времени даже после выхода молекулярного водорода из световода. Таким образом, можно подготовить необходимые участки световода для последующей записи решеток, предварительно облучив их небольшой дозой. Оказалось, что такую предварительную обработку можно проводить не только на длине волны, на которой будет проводиться запись решеток, но и на других длинах волн в УФ-диапазоне, в том числе излучением ультрафиолетовой лампы.

Интересным методом является увеличение фоточувствительности с помощью механического растяжения световода при записи в нем решеток. При этом наведенный ПП увеличивается в 3 – 4 раза при фиксированных параметрах облучения в сравнении с ненатянутым световодом, что позволяет сократить время записи решеток примерно на порядок.

67

формировался легированием другими элементами. Так, было обнаружено, что при облучении на длине волны 193 нм высокую фоточувствительность имеют световоды, легированные азотом, фосфором, серой, сурьмой.

1.3.2.5. Методы увеличения фоточувствительности волоконных световодов

Несмотря на то, что был предложен целый ряд составов, обладающих повышенной фоточувствительностью, правило, как волоконные световоды на их основе сложны в изготовлении и, кроме того, имеют материальные и волноводные характеристики, отличные ОТ обстоятельство стандартных. Последнее часто приводит к дополнительным потерям на стыковку таких световодов со стандартными и некоторым другим сложностям при их использовании.

В этой связи значительный интерес представляло увеличение фоточувствительности уже изготовленных, в том числе стандартных световодов без значительного изменения их собственных характеристик. Оказалось, что насыщение сетки стекла водородом при высокой температуре, например в пламени горелки с высоким содержанием водорода, способно на порядок увеличить наведенный показатель преломления стандартных световодов. Такая обработка может быть выполнена на небольшом участке световода и обеспечивает повышенную фоточувствительность этого участка в течение длительного времени. Вместе с тем это приводит к значительному росту концентрации *ОН* групп в сетке стекла, которые имеют полосы поглощения в области 1.4 мкм. Кроме того, значительно уменьшается механическая прочность световода.

Существует принципиально другой способ водородной обработки, увеличивает которая также существенно фоточувствительность германосиликатных световодов. Этот способ заключается в насыщении молекулярным водородом при относительно сетки стекла низких температурах (~100°С). При таких температурах еще не происходит взаимодействие молекулярного водорода с сеткой стекла, и водород находится в стекле в физически растворенном состоянии. Для такого насыщения световод погружают в камеру с водородом при давлении ~100 атм. Коэффициент диффузии молекулярного водорода в кварцевом стекле экспоненциально достаточно высок И зависит ОТ температуры. Практически полное насыщение световода (98% от максимального значения) при комнатной температуре достигается через две недели, а при температуре 100°С - уже через 12 часов. Концентрация молекулярного водорода в сетке стекла при такой обработке достигает 2 - 3 мол.%. Световод, подвергнутый низкотемпературной водородной обработке, имеет повышенную фоточувствительность до тех пор, пока водород находится в сетке стекла. По мере обратной диффузии водорода в окружающую среду фоточувствительность уменьшается, возвращаясь к

66

в середине 90-х годов после первых работ по волоконным иттербиевым лазерам с накачкой через первую оболочку. Но уже в этих работах было показано - эффективность генерации иттербиевых волоконных лазеров может быть существенно выше, чем неодимовых. В середине 90-х годов произошел качественный скачек в области создания мощных промышленных волоконных лазеров и их коммерциализации. Этому послужили три фактора: использование полупроводниковых лазеров для накачки, разработка брэгговских волоконных резонаторов и создание активированного волокна с двойной оболочкой.

Волоконные лазеры явились символом наступления нового века для лазерной техники. Начав свой выход на рынок промышленных систем на рубеже веков, они по совокупности параметров, надежности и ресурсу существенно превосходят промышленные лазеры других типов (например, газовый - CO_2 , твердотельный - Nd:YAG). Производством волоконных лазеров, в силу новизны этого направления, занимаются лишь несколько компаний в мире - IPG Photonics Corp и JDS Uniphase, . Ведущей является IPG Photonics Corp. — международная научно-производственная группа российского происхождения. На долю IPG приходится более 75% мирового объема выпуска волоконных лазеров и усилителей, при этом большинство типов волоконных лазеров, включая промышленные лазеры киловаттного диапазона мощности, производит только IPG.

На рис.1.2.15 показана динамика развития волоконных лазеров. В настоящее время мощность излучения одномодовых волоконных лазеров уже превысила 1000 Вт, а в многомодовом режиме приближается к 20 кВт.

В настоящее время волоконные лазеры перестали быть экзотикой и все шире применяются в различных отраслях промышленности. Благодаря своим характеристикам они могут служить хорошей заменой для СО₂ и *Nd:YAG* лазеров в таких отраслях, как лазерная сварка и резка, нанесение покрытий. Кроме того, они находят массу применений в медицине, метрологии, научных исследованиях и других областях науки и техники. Сегодня основными областями применения волоконных лазеров являются маркировка, резка, сварка, термообработка. Так например, для резки применяют волоконные лазеры с выходной мощностью от 50 Вт до 5 кВт. Выбор типа лазера и уровня мощности определяется типом и толщиной обрабатываемых материалов, а также необходимой скоростью резки. Например, лазеры мощностью до 200 Вт подходят для резки металлов толщиной до 1-2 мм. Для резки металлов толщиной 3-10 мм обычно используют волоконные лазеры мощностью 0,4-2 кВт а для толщин 10-20 мм используются лазеры мощностью 3-5 кВт. Волоконные лазеры мощностью 5-20 кВт используются главным образом для сварки.

Рынок волоконных и прежде всего мощных лазеров, используемых для обработки материалов стремительно растет. Ежегодный рост составляет 15%. В 2008 г. рынок волоконных лазеров составил 490 млн. долларов,

Это примерно треть рынка всех твердотельных лазеров, составившего в 2008 г. 1500 млн долларов.



Рис.1.2.15. Динамика развития волоконных лазеров

1.2.3.2. Сравнение волоконных лазеров с другими типами лазеров

В течение долгого времени развитие мощных непрерывных лазеров шло по двум основным направлениям: газовые (в основном CO₂) лазеры и твердотельные лазеры (в основном на кристаллах Nd: YAG). Мощные CO_2 лазеры до сих пор являются наиболее распространенными лазерными устройствами, применяемыми в обработке материалов. Это связано в первую очередь с наименьшей среди прочих типов лазеров стоимостью одного что объясняется использованием ватта излучения, прямой электрической накачки и относительно высоким КПД (около 10% «от розетки»). Основными недостатками таких систем являются: 1) длина волны излучения СО₂ лазера - 10,6 мкм плохо пригодна для обработки материалов с высоким коэффициентом отражения (металлы типа Al, Cu), а отсутствие волоконных световодов в данном диапазоне на сегодняшний день усложняет доставку излучения, 2) резонаторы мощных СО₂ лазеров требуют периодической настройки, 3) параметры пучка и стабильность мощности очень чувствительны к обратным отражениям, 4) мощные СО2 лазеры, как правило, не мобильны (большие габариты и вес). Мощности

Отметим, что излучение эксимерных лазеров ArF (193 нм) и F_2 (157 нм) также индуцирует значительное изменение ПП кварцевых стекол, причем не только германосиликатных.

В последнее время увеличилось число публикаций, посвященных записи решеток ПП с помощью лазерных импульсов фемтосекундной длительности. В силу очень высокой интенсивности излучения, создаваемой в импульсе с такой короткой длительностью (~10¹³ BT/cm²) поглощение излучения в этом случае происходит в результате многофотонного процесса, при этом существенную роль может играть зонное поглощение стекла.

1.3.2.4. Фоточувствительные стекла для записи волоконных решеток

Величина наведенного ПП в сердцевине волоконного световода зависит от многих факторов, таких как метод и условия изготовления самого световода, тип и концентрация легирующих элементов, длина волны, интенсивность и тип (импульсный или непрерывный) облучения.

фоточувствительность К сожалению. стандартных телекоммуникационных световодов с концентрацией германия 3 - 5 мол.% недостаточно высока для эффективной записи в них решеток ПП. Даже при длительном облучении наведенный ПП в таких световодах не превышает 5 10⁻⁵. В связи с этим значительные усилия были предприняты в поисках способов повышения этой величины. В частности, было фоточувствительность германосиликатных световодов показано, что увеличивается с ростом концентрации диоксида германия в сердцевине, что главным образом связано с ростом концентрации ГКДЦ при увеличении степени легирования стекла германием. Обычно величина поглощения на 242 нм пропорциональна концентрации германия с коэффициентом пропорциональности 10 - 40 дБ/(мм·мол.% GeO₂). Заметное повышение концентрации ГКДЦ может быть также достигнуто при синтезе заготовки волоконного световода в условиях дефицита кислорода, например, при замене его азотом или инертными газами. Такой подход позволяет повысить фоточувствительность, сохранив при этом волноводные свойства световода.

В настоящее время были исследованы световоды в широком диапазоне концентраций диоксида германия. В частности, было показано, что, начиная с 20 мол.% *GeO*₂, в световодах возникает фоточувствительность типа IIa, которая сохраняется и усиливается с дальнейшим ростом концентрации *GeO*₂.

К числу химических элементов, увеличивающих фоточувствительность световодов при совместном легировании с германием, относятся бор, олово, азот, фосфор, сурьма. В ряде работ исследовались световоды, не содержащие германия, профиль ПП в них

65

воздействия, в силу процессов теплопереноса вдоль оси световода, как правило, ограничена размером порядка его диаметра, что делает затруднительным запись решеток с малыми периодами ($\Lambda < 200$ мкм).

Помимо необратимой записи ДПВР, существуют методы обратимого формирования решеток в волоконном световоде. Отметим метод индуцирования ДПВР акустической волной с частотой порядка 2 МГц. Эффективность связи и спектральное положение резонанса в этом случае задаются амплитудой и частотой высокочастотного сигнала соответственно, в то время как длина очищенной от полимерной оболочки части волоконного световода определяет спектральную ширину резонанса. Особенностью такой решетки является возможность гибкого управления ее спектральными характеристиками и одновременного формирования нескольких ДПВР при подаче смеси радиочастотных сигналов.

1.3.2.3. Лазерные источники, используемые для записи волоконных решеток

Механизмы фотоиндуцированного изменения ПП в кварцевом стекле до сих пор недостаточно исследованы даже для наиболее изученных стекол, легированных диоксидом германия (GeO₂). Однако известно, что фотовозбуждение лля германосиликатного стекла германиевых кислородно-дефицитных центров (ГКДЦ) играет инициирующую роль для последующей трансформации сетки стекла, которая сопровождается изменением его ПП. В спектре поглощения германосиликатного стекла доминируют две полосы с максимумами 242 и 330 нм, приписываемые синглет-синглетному синглет-триплетному поглощению И ГКДЦ соответственно. Фотовозбуждение синглетной полосы осуществляется излучением KrF эксимерного лазера (248 нм), второй гармоники аргонового лазера (244, 257 нм), четвертой гармоники Nd³⁺:YAG лазера (266 нм) или второй гармоники лазеров на красителях. Эти источники излучения, как правило, и используются для записи решеток ПП.

Полоса триплетного поглощения на три порядка менее интенсивная, однако она также может быть использована для наведения значительного ПП ($\sim 2 \cdot 10^{-4}$). Сравнительный анализ изменения ПП при синглетном и триплетном фотовозбуждении ГКДЦ показал, что преобладающим механизмом в процессе наведения ПП является трансформация этих центров из возбужденного триплетного состояния вне зависимости от того, какая полоса используется для фотовозбуждения. Привлекательность записи решеток в полосу триплетного поглощения заключается в том, что при этом решетку можно записывать без очистки световода от защитного полимерного покрытия, которое является в значительной степени прозрачным в этом диапазоне спектра.

промышленных *CO*₂ лазеров достигают величины 100 кВт, такие мощные лазеры используются в судо-, авиа- и автомобилестроении.

В непрерывных лазерах на кристаллах Nd:YAG используется ламповая или диодная накачка. КПД лазера "от розетки" составляет 2-3% для ламповой накачки и 4-6% - для диодной. Стоимость за ватт излучения таких лазеров выше, чем в CO_2 лазерах, однако они обладают более удобной для обработки материалов длиной волны генерации - 1,06 мкм. Излучение с такой длиной волны не только лучше поглощается материалами, но и может подводиться в труднодоступные места с помощью волоконных световодов, существующих в настоящее время. Данный тип лазеров так же обладает рядом существенных недостатков, а именно: низкий КПД (до 6%), не высокое качество пучка по сравнению с CO_2 лазерами, и низкая стабильность выходных параметров. Кроме того, такие лазеры так же практически не мобильны. Мощность современных промышленных Nd:YAG лазеров достигает величины порядка 15 кВт.

Основные преимущества мощных волоконных лазеров в сравнении с другими типами мощных газовых и твердотельных лазеров вытекают из свойств самих волоконных световодов и заключаются в:

- долговечности и прочности конструкции волоконных лазеров;

- отсутствии проблем с тепловыми эффектами из-за большого отношения поверхности к объему активной области, что обеспечивает эффективный теплоотвод и предотвращает появление больших градиентов температуры в сердцевине;

- высоком, вплоть до дифракционно-ограниченного, качестве выходного излучения и стабильности его параметров;

- высокой эффективности по отношению к оптической накачке (лазерными диодами) вплоть до 85%, а «от розетки» до 30%;

- удобной длине волны излучения в диапазоне прозрачности волоконных световодов на основе кварцевого стекла (1-2 мкм);

- компактности и малом весе.

Дополнительно можно следующие особенности отметить В волоконных лазерах отсутствует волоконных лазеров. эффект термолинзы, который имеет место в активных кристаллах и стеклах твердотельных лазеров. Отсутствует эффект искажения волнового фронта, который имеет место в кристаллах вследствие его дефектов. Эти эффекты всегда были препятствием для достижения максимальных возможностей твердотельных лазерных систем. На выходе волоконного лазера получается идеальный одномодовый лазерный пучок с равномерным распределением мощности, что позволяет сфокусировать излучение в пятно малого размера и иметь большую, чем в случае мощных твердотельных *YAG*-лазеров, глубину резкости (каустики) (рис.1.2.16). Это чрезвычайно важное для лазерных систем свойство, особенно для многолучевых оптических систем.



Рис.1.2.16. Форма пучка разных лазерных источников: а — волоконный лазер; б — Nd:YAG-лазер; в —лазерный диод

Наряду с рядом достоинств волоконные лазеры обладают несколькими недостатками, главным из которых можно считать более высокую стоимость систем накачки для волоконных лазеров по сравнению с другими типами мощных лазеров, что естественным образом негативно сказывается на конечной стоимости мощных волоконных лазерных систем.

Рассмотрим основные элементы и схемы волоконных лазеров.

1.2.3.3. Основные элементы конструкции волоконных лазеров

Конструкция любого лазера включает в себя три основных элемента: активную среду, в которой происходит усиление проходящего света, резонатор, обеспечивающий устойчивую обратную связь для генерируемого излучения, и накачку, с помощью которой в среде создается инверсная населенность.

Принцип усиления света основан на явлении вынужденного излучения впервые описанного Эйнштейном. Если фотон с определенной энергией падает на возбужденный атом, энергия возбуждения которого относительно какого-либо нижнего уровня равна энергии падающего фотона, то с некоторой вероятностью возбужденный атом испустит квант света и перейдет на этот более низкий уровень. При этом испущенный фотон будет идентичен падающему по всем параметрам - энергии, поляризации, направлению распространения. Используя этот принцип можно добиться таких условий в среде, при которых мощность проходящего через нее излучения, будет усиливаться. Что бы добиться усиления в среде необходимо создать инверсную населенность на рабочих уровнях, то есть ситуацию, когда на верхнем лазерном уровне (в возбужденном состоянии) находится большее число атомов, чем на нижнем лазерном уровне. Именно в этом случае количество актов вынужденного излучения будет превышать количество актов поглощения, так как вероятности этих процессов одинаковы. В обычных условиях (без внешнего воздействия) в среде распределение атомов по энергиям Больцмана, подчиняется статистике что исключает инверсную населенность, а значит и усиление. Обычно среда, в которой создана инверсная населенность, называется активной, а атомы и ионы, которые непосредственно участвуют в усилении, называются активными.

волоконной решетки	
Вторая гармоника аргонового лазера Spectra-Physics:	
Длина волны	244 нм
Выходная мощность	150 мВт
Расходимость	~1 мрад
Длина когерентности	~5 см
Пошаговая технология записи длиннопериодных решеток:	
Плотность сфокусированного на	до 15 кВт/см2
волоконном световоде УФ излучения	
Длина решетки	до 290 мм
Коэффициент поглощения на	> 30 дБ
резонансной длине волны	
Ширина пика поглощения	1 - 100 нм
Спектральная характеризация:	
Диапазон длин волн	800 - 1700 нм
Разрешение	0.1 нм
Время измерения	~1 мин

Таблица 1 3 1 Характеристики установки для пошаговой записи длиннопериодной

Создание ДПВР пошаговым методом возможно также с помощью локального прогрева волоконного световода до высоких температур ~ 1000°С. В результате такого теплового воздействия изменение профиля может происходить в силу ряда причин: механическая деформация световода; перераспределение волоконного существующих упругих напряжений вследствие упругооптического эффекта; пространственное перераспределение химического состава стекла вследствие термоиндуцированной диффузии элементов, легирующих область сердцевины. Указанное тепловое воздействие может быть осуществлено лазерными источниками (СО₂-лазер, СО-лазер) или инфракрасными Достаточно электрическим локализованным разрядом. глубокие решетки могут быть термоиндуцированные записаны в нефоточувствительных малофоточувствительных волоконных или световодах, например, в световодах с чисто кварцевой сердцевиной. Так как решетки наводятся при локальном прогреве волоконного световода до температуры, близкой к температуре плавления кварцевого стекла, они обладают более высокой температурной стойкостью в сравнении с фотоиндуцированными решетками И не распадаются лаже при температурах порядка 1000°С. В то же время термоиндуцированные решетки, как правило, вносят спектрально-независимые (так называемые "серые") потери, вызванные механической деформацией волоконного световода при записи. Сильная зависимость скорости термоиндуцированных процессов от температуры требует для получения однородных решеток высокую воспроизводимость температуры прогрева и длительности экспозиции от шага к шагу. Как правило, эта воспроизводимость недостаточно высока, что в большинстве случаев приводит к неоднородности спектра. Кроме того, локальность теплового



Рис.1.3.8. Схемы записи длиннопериодных решеток УФ-излучением: с помощью амплитудной маски (а); пошаговым методом (б)

В пошаговом методе (рис.1.3.8,б) формирование необходимой периодической структуры решетки осуществляется последовательно при помощи механической трансляции волоконного световода относительно сфокусированного на сердцевину лазерного излучения. При записи ДПВР таким способом более предпочтительно использование непрерывных источников излучения, так как при этом возможно увеличение плотности УФ-излучения и соответственно сокращение времени записи решетки. Пошаговый метод записи является более гибким, так как позволяет формировать произвольные профили отдельного штриха и распределения амплитуды наведенного ПП и периода по длине решетки. Такая используется, в частности, для подавления возможность боковых максимумов пиков поглощения, а также резонансов, вызванных высшими периодической решетки. гармониками структуры Типичная схема установки пошаговой записи с характеристиками приведены на рис.1.3.8, в и таблице 1.3.1.



Рис.1.3.8, в. Установка пошаговой записи длиннопериодной брэгговской решетки

Чтобы достичь инверсной населенности в среде необходимо внешнее воздействие, направленное на перевод активных атомов в возбужденное состояние. Таким воздействием может быть оптическое, электрическое, химическое и любое другое воздействие позволяющее перевести атомы в нужное возбужденное состояние. Внешнее воздействие называется накачкой. В волоконных лазерах используется оптическая накачка, то есть возбуждение активных атомов осуществляется посредством внешнего оптического излучения. Инверсная населенность в среде может быть достигнута только при определенной конфигурации энергетических уровней. Например, в чисто двухуровневой среде нельзя создать стационарную инверсию с помощью оптической накачки. Существуют две основных схемы уровней атомов, позволяющих получить инверсию при помощи оптической накачки - трехуровневая схема (рис.1.2.4) и четырехуровневая схема (рис.1.2.17). В первом случае кванты накачки переводят активные атомы из состояния 1 в состояние 3, затем за счет безызлучательной релаксации атом переходит в состояние 2, откуда он под действием внешнего поля переходит обратно в состояние 1. Чтобы достичь инверсии в такой схеме необходимо мощное излучение накачки, которое было бы в состоянии перевести более половины атомов в возбужденное состояние. Если же использовать четырехуровневую схему требования к мощности накачке существенно ослабляются за счет того, что в данном случае для достижения инверсии между уровнями 1 и 2 достаточно накачки небольшой мощности, так как уровень 1 практически не заселен. Как правило, достичь генерации по четырехуровневой схеме значительно проще, чем по трехуровневой. В этом отношении для создания мощных лазеров наиболее привлекательны ионы неодима, работающие по четырехуровневой схеме и ионы иттербия (рис.1.2.17,*a*), работающие по квази-четырехуровневой схеме (рис.1.2.17,б).



Рис. 1.2.17. Четырехуровневая схема неодима (а) и квази-четырехуровневая схема иттербия (б)
В волоконных лазерах в качестве активной среды используется сердцевина световода, легированная ионами Yb^{3+} или других активных ионов $(Er^{3+}, Tm^{3+}, Nd^{3+}, Pr^{3+}, Ho^{3+}$ и др.) в зависимости от требуемой длины волны генерации.

Резонаторы лазерных систем

Для того чтобы из усилителя излучения сделать оптический генератор (лазер) требуется положительная обратная связь, возвращающая часть усиленного изучения обратно в активную среду. В отсутствии обратной связи или если она недостаточна для возникновения генерации система будет работать как усилитель проходящих сигналов, а так же собственного спонтанного и теплового излучения. Достаточной для возникновения генерации является такая обратная связь, потери на которой компенсируются усилением в активной среде при данном уровне накачки. При этом минимальная мощность накачки, позволяющая компенсировать потери, называется пороговой мощностью возникновения лазерной генерации. Величина пороговой мощности зависит от величины обратной связи - чем сильнее обратная связь, тем меньше пороговая мощность. Элементы резонатора лазера амплитудной, могут служить для пространственной, частотной, фазовой и поляризационной фильтрации генерируемого излучения.

В конструкции резонатора лазера могут быть использованы такие элементы, как зеркала (металлические или диэлектрические, плоские или вогнутые и прочее), дифракционные решетки, волоконные брэгговские решетки показателя преломления, мультиплексоры и другие специальные Кроме того, В качестве элементов резонатора элементы. ΜΟΓΥΤ использоваться грани и сколы активной среды или каких-либо других лазера, например сколотый под прямым углом торец элементов волоконного световода. Все указанные элементы могут использоваться в резонаторах как объемных, так и волоконных лазеров.

Активированные волокна с двойной оболочкой

Для работы любого лазера требуется соответствующая накачка. В частности в волоконных лазерах используется оптическая накачка, то есть для создания инверсии в активной среде требуется внешнее излучение оптического диапазона. Например, для накачки *Nd* лазеров требуется излучение с длиной волны в районе 810 нм, для *Yb* лазеров в области 910-980 нм, хотя можно использовать и другие длины волн, попадающие в полосу поглощения.

Накачка первых волоконных лазеров осуществлялась через боковую поверхность с помощью излучения ламп-вспышек. Такая схема накачки позволяла достичь эффективности генерации, то есть отношения мощности генерации к мощности источников накачки, не более 5%. Это связано, в первую очередь, с тем, что большая часть мощности накачки не

жесткая фиксация возможных параметров ВБР на стадии изготовления маски является одним из основных недостатков указанной схемы.



Рис.1.3.7. Схемы записи брэгговских решеток с помощью фазовой маски: прямая запись (а), запись в интерферометре Тальбота (б)

Перестройку резонансной длины волны ВБР в относительно широких пределах можно осуществить в интерферометре Тальбота соответствующим поворотом дополнительных зеркал (рис.1.3.7,б). Отметим также, что для формирования решеток с произвольным распределением индуцированного ПП весьма перспективными являются методы сканирования УФ-пучка относительно фазовой маски.

1.3.2.2. Методы изготовления длиннопериодных решеток

Поскольку характерные значения периода длиннопериодных волоконных решеток на 2 - 3 порядка больше в сравнении с брэгговскими решетками, методы изготовления ДПВР существенно отличаются от методов записи ВБР. При этом значительно снижаются требования, накладываемые на механическую стабильность записывающей системы и когерентность УФ-излучения. Среди наиболее распространенных способов записи фотоиндуцированных ДПВР следует отметить два метода: метод с использованием амплитудной маски и пошаговый метод.

При записи ДПВР через амплитудную маску (рис.1.3.8,*a*), как правило, вся структура решетки формируется одновременно, поэтому запись решетки в целом занимает столько же времени, сколько и запись отдельного ее штриха. При использовании импульсных источников этот метод наиболее предпочтителен, так как плотность энергии в импульсе нельзя существенно увеличить из-за относительно низкого порога разрушения поверхности кварцевого стекла (~1 Дж/см² для излучения УФ эксимерных лазеров).

закрепленным на нем световодом, что значительно проще в сравнении с тем, как это делается в интерферометре, изображенном на рис.1.3.6,а. Отметим, что цилиндрическая линза, используемая в обеих схемах, представленных на рис.1.3.6, служит для фокусировки излучения на волоконный световод (в ряде случаев на его сердцевину), что, как правило, необходимо для увеличения плотности УФ-излучения при записи брэгговских решеток.



Рис.1.3.6. Схемы записи брэгговских решеток в интерферометрах с амплитудным (а) и пространственным (б) разделением пучка УФ-излучения

Указанные типы интерферометров обладают гибкостью в выборе параметров (период, длина) записываемых решеток, однако требуют высокую пространственную и временную когерентность записывающего излучения.

Запись ВБР через фазовую маску (рис.1.3.7,а) значительно снижает требования к когерентности УФ излучения, поэтому часто применяется с использованием недорогих УФ эксимерных лазеров, у которых , как правило, низкая длина когерентности лазерного излучения (несколько мм). В этом методе реализуется интерференция между плюс первым и минус первым дифракционными порядками излучения, прошедшего через фазовую маску. Маска, как правило, изготавливается из прозрачного в ультрафиолетовой части спектра кварцевого стекла и имеет определенный рельеф обращенной к световоду поверхности. Рельеф выполнен таким образом, чтобы подавить нулевой и другие порядки дифракции, кроме плюс первого и минус первого, и обеспечить тем самым высокий контраст интерференционной картины. Отметим, что изготавливаемые в настоящее время фазовые маски позволяют записывать структуры ВБР, имеющие переменные по длине период и амплитуду модуляции ПП. Вместе с тем

В 1973 году впервые была использована поглощалась. накачка волоконного лазера через торец световода прямо в сердцевину. Такая схема позволяла поглотить всю мощность излучения накачки, а значит и существенно повысить эффективность генерации. Однако, очевидно, что в этом случае невозможно использовать ламповую накачку из-за ее малой яркости, а единственно возможным источником накачки по такой схеме становятся лазеры. Таким образом, для эффективной накачки волоконных лазеров можно использовать твердотельные либо полупроводниковые лазеры, причем яркость последних позволяет до сих пор вводить в одномодовую сердцевину мощность более нескольких ватт.

Чтобы ПОДНЯТЬ выходную мощность волоконных лазеров И упростить ввод излучения полупроводниковых лазерных диодов В волоконный световод, Снитцер в 1988 году предложил использовать световод с двойной оболочкой – (в англоязычной литературе – double clad fiber – DCF). Световод такой конструкции представляет собой (рис.1.2.18) одномодовую или маломодовую сердцевину - 1 внутри многомодового световода (первой оболочки) - 2, окруженного второй оболочкой (полимерной или из кварцевого стекла) с более низким показателем преломления - 3. Снаружи такая конструкция иногда покрывается защитной оболочкой - 4. В такой структуре излучение накачки за счет полного внутреннего отражения от второй оболочки распространяется по первой оболочке, постепенно поглощаясь в легированной активными ионами сердцевине, по которой распространяется излучение генерации. Площадь первой оболочки может быть значительно больше площади сердцевины, что позволяет ввести в такую структуру значительно больше мощности чем В сердцевину. Несмотря на накачки. такое усовершенствование использование ламповой накачки ДЛЯ таких волоконных лазеров практически исключено, так как максимальная площадь сечения первой оболочки не превышает 1 мм², а как правило лежит в пределах 0,01-0,1 мм². Увеличение площади первой оболочки ограничено в первую очередь необходимостью иметь достаточное поглощение излучения накачки из первой оболочки. Сечение первой оболочки можно сделать прямоугольным (рис.1.2.19), и таким образом можно максимальным образом согласовать апертуру и структуру полей самого канала накачки с лазерным диодом, используемым для накачки и, соответственно, увеличить эффективность накачки.



Рис.1.2.18. Активное волокно с двойной оболочкой (DCF): 1 – сердцевина, активированная иттербием, с показателем преломления *n*1, 2 – первая оболочка для распространения накачки с *n*2 (*n*2< *n*1), 3 – вторая оболочка с *n*3 (*n*3 <*n*2), 4 -защитное покрытие



Рис.1.2.19. Активное волокно с двойной оболочкой (DCF): 1 – сердцевина, активированная иттербием, с показателем преломления *n*1, 2 – первая оболочка для распространения накачки с *n*2 (*n*2< *n*1), 3 – вторая оболочка с *n*3 (*n*3 <*n*2), 4 -защитное покрытие

Поглощение ограничено ПО сердцевине максимальной технологически доступной концентрацией активных ионов, а площадь сердцевины ограничена условиями ее одномодовости или маломодовости и другими параметрами. В зависимости от формы поперечного сечения световода меняется доля мод, не перекрывающихся с сердцевиной. Очевидно, что для наилучшего поглощения излучения накачки требуется такая форма световода, которая минимизировала или исключала бы существование таких мод. Кроме того, для повышения поглощения в световодах, допускающих распространение таких мод можно поместить сердцевину световода не в центр (рис.1.2.19), или использовать изгиб улучшает обмен между модами, пересекающими световода. что сердцевину и модами, имеющими в центре минимум.

Фотонно-кристаллические активированные волокна

В последнее время бурное развитие получили лазеры на основе фотонно-кристаллических волокон (подробно про фотоннокристаллические волокна см. в разделе 1.5). На рис.1.2.20 показан пример фотонно-кристаллического волокна, активированного иттербием, с ярко выраженными поляризационными свойствами. Фотонно-кристаллические волокона имеют следующие отличительные особенности по сравнению с обычными волокнами:

- высокая числовая апертура 0.6 (предельные теоретические значения 0.9);

- большой диаметр сердцевины (до 40 мкм), который может поддерживать одномодовый режим. В результате этого в фотонно-кристаллических волокнах можно реализовывать высокие мощности накачки и генерации без заметного нагрева;

- отсутствие нелинейных эффектов;

коротких волн, а также пройденные ими расстояния, время их прихода к пункту назначения одинаково.



Рис.1.3.5. Чирпированная решетка для компенсации дисперсии

1.3.2. Технологии изготовления волоконных решеток

1.3.2.1. Методы изготовления волоконных брэгговских решеток малого периода

В силу малого периода ВБР ($\Lambda \sim 0.5$ мкм) их, как правило, формируют с использованием интерференционных методов. Так как процесс записи необходимой решеточной структуры может длиться несколько десятков минут, изготовление качественной решетки возможно лишь при высокой стабильности интерференционной картины. Несмотря на то, что число предложенных схем записи ВБР довольно велико, можно выделить ряд основных принципов их организации.

В первом интерферометре, который использовался для записи брэгговских решеток (рис.1.3.6,а), использовалось амплитудное разделение исходного УФ пучка с помощью светоделительной пластины. Пучки затем сводились в области расположения облучаемого световода под определенным углом *а* друг к другу. Этот угол задает период интерференционной картины и, следовательно, период ВБР.

Часто записи ВБР используют интерферометры для С пространственным которые разделением пучка, имеют меньшее количество оптических элементов и, следовательно, большую временную стабильность. Такой интерферометр может быть создан, например, с использованием диэлектрического зеркала, которое делит фронт пучка на две равные части (интерферометр Ллойда, рис.1.3.6,б). Перестройка угла а в данном случае осуществляется путем поворота зеркала вместе с знаменателя с ростом номера оболочечной моды приводит к увеличению температурной чувствительности.

Чувствительность ДПВР к натяжению в зависимости от типа световода может варьироваться в широком диапазоне от 15 до -7 нм/%. Величина и знак этого коэффициента определяется разностью упругооптических коэффициентов областей сердцевины и оболочки световода.

Чувствительность положения резонансной длины волны по отношению к величине внешнего ПП может достигать $dl_{LPG}/dn_{ext} \sim 10^4$ нм, если ПП внешней среды немного меньше ПП кварцевой оболочки световода. Когда $n_{ext} > n_{cl}$, резонансная длина волны становится нечувствительной к ПП внешней среды n_{ext} .

Спектр пропускания ДПВР имеет высокую чувствительность к изгибу решетки. С одной стороны это влечет за собой повышенное внимание к фиксации решетки при работе с ней, с другой - открывает перспективу использования таких решеток в качестве датчиков изгиба и деформации. Изгиб решетки приводит к уменьшению амплитуды решетки и его смещению в длинноволновую область спектра, причем эти изменения столь велики, что относительно легко может быть зарегистрирован изгиб световода с радиусом ~1 м.

Постоянные распространения оболочечных мод зависят от диаметра оболочки световода. Этот факт позволяет осуществить необратимое смещение резонансной длины волны решетки. Диаметр оболочки может быть уменьшен, например, путем химического травления световода в растворе плавиковой кислоты HF. Такая процедура позволяет сместить резонансную длину волны на довольно большое расстояние, практически не изменяя коэффициент связи решетки. Смещение длины волны увеличивается с ростом номера оболочечной моды, и для мод высокого порядка может составлять 100 нм и более.

1.3.1.3. Волоконные брэгговские решетки с переменным периодом

Период брэгговской решетки может изменяться по длине волокна. Такие дифракционные решётки с линейно изменяющейся постоянной называются **чирпированными решетками** (chirped gratings). Использование чирпированных решеток позволяет компенсировать дисперсию в оптическом волокне. На рис.1.3.5 показан принцип работы чирпированной решетки для компенсации дисперсии. Разные длины волн отражаются от разных участков решетки, имеющие разный период: длинные волны отражаются от участка с большим периодом, короткие волны проходят больший путь и отражаются от области с малым периодом. В результате этого несмотря на разные скорости длинных и - высокая анизотропия структуры волокна, позволяющая пропускать излучение с высокой степенью поляризации.



Рис.1.2.20. Лазер на основе иттербиевого анизотропного фотонно-кристаллического волокна, (компания Crystal Fiber, Denmark). Характеристики: эффективность >70%, мощность поляризованного лазерного излучения = 3 Вт, отношение поляризаций 200:1

Схемы волоконных лазеров

Ha рис.5.2.21 показана одна простейших ИЗ первых схем волоконного лазера. Основными элементами такого лазера являются активированное эрбием или иттербием волокно и резонатор, состоящий из двух дихроичных зеркал – входного и выходного. Входное зеркало пропускает длину волны накачки (например. 980 нм) и является «глухим» для рабочей длины волны (в случае эрбия – 1.54 мкм, в случае иттербия -1,07 мкм). Выходное зеркало является частично прозрачным для рабочей длины волны. Накачка осуществляется в торец через микрообъектив. Недостатками такой схемы являются использование объемных оптических элементов (зеркал, линз) в качестве «навесного» монтажа.

На рис.1.2.22 и 1.2.23 показаны наиболее часто встречающиеся схемы волоконного лазера с резонатором в виде брэгговских зеркал (см. раздел 1.3). Брэгговская решетка может быть создана на концах не активированного волокна (рис.1.2.22) или на концах активированного волокна (рис.1.2.23), Последний вариант называется лазер с распределенной обратной связью (в англоязычной литературе - distributed Bragg resonator - DBR laser).

В волоконном лазере сам принцип его устройства и работы гарантирует высокие характеристики делает такие лазеры И совершенными, практически идеальными преобразователями светового излучения в лазерное. Так например, на рис.1.2.24 показана типичная экспериментальная зависимость выходной мощности иттербиевого волоконного лазера от мощности накачки, Мощность такого лазера достигает более 5 Вт, а эффективность 75%.







Рис.1.2.22. Модуль волоконного лазера с резонатором в виде брэгговских зеркал (решеток) в волокне, не активированном редкоземельными ионами



Рис.1.2.23. Модуль волоконного лазера с резонатором в виде брэгговских зеркал (решеток) в волокне, активированном редкоземельными ионами - лазер с распределенной обратной связью



Рис.1.3.4,в. Спектр пропускания длиннопериодной решетки с гауссовым профилем ПП (длина решетки - 40 мм, доза УФ облучения - 15 кДж/см², период - 150 мкм)

Спектральные характеристики ДПВР зависят от таких параметров, как температура, натяжение и изгиб световода, а также ПП среды, окружающей световод с решеткой. Влияние температуры T на спектр длиннопериодной решетки проявляется главным образом в изменении резонансной длины волны λ_{LPG} . Температурная чувствительность сдвига резонансной длины волны для длиннопериодных решеток $\Delta \lambda_{LPG} / \Delta T$ зависит от номера связываемой оболочечной моды и обычно составляет ~ 0.05-0.1 нм/К. Соотношение, описывающее температурную чувствительность решетки, представляется выражением:

$$\frac{\Delta\lambda_{LPG}}{\lambda_{LPG}} = \frac{\frac{1}{\Delta n_{eff}}}{\frac{\partial(\Delta n_{eff})}{\partial T}} + \frac{1}{\Lambda}\frac{d\Lambda}{dT}}{1 - \Lambda\frac{\partial(\Delta n_{eff})}{\partial\lambda}} * \Delta T$$
(1.3.5)

где Δn_{eff} - разность эффективных показателей преломления основной и оболочечной мод.

Вторым слагаемым в числителе этого уравнения, представляющим собой коэффициент теплового расширения кварцевого стекла, как правило, можно пренебречь в сравнении с первым. Таким образом, основными факторами, определяющими температурную чувствительность длиннопериодных решеток, являются термооптические коэффициенты сердцевины и оболочки световода, а также спектральные зависимости эффективных ПП связываемых мод на рассматриваемой длине волны второй член в знаменателе выражения (1.3.5). Отметим, что уменьшение Приведенный спектр является типичным для однородных ДПВР, его характерной особенностью является монотонное возрастание интенсивности межмодового взаимодействия с ростом радиального модового числа m оболочечных HE_{1m} мод.





расчетные спектры пропускания длиннопериодных решеток.



Рис.1.3.4, б. Спектр пропускания длиннопериодной решетки со ступенчатым профилем ПП (длина решетки - 40 мм, доза УФ облучения - 10 кДж/см², период - 150 мкм)



Рис.1.2.24. Зависимость выходной мощности иттербиевого волоконного лазера от мощности накачки

Рассмотрим ключевые технологии получения волокон, легированных редкоземельными ионами

1.2.3. Технологии производства активных волокон, легированных редкоземельными ионами

Технологии изготовления активных волокон, легированных редкоземельными ионами, похожи на технологии MCVD, VAD и OVD, используемые для создания заготовок-преформ магистральных оптических волокон. В эти технологии добавляется еще промежуточные операции - пропитка не проплавленного материала сердцевины раствором солей эрбия либо легирование ионами эрбия из газовой фазы непосредственно в процессе осаждения сердцевины

1.2.3.1. Методы парофазного осаждения для получения заготовок, активированных редкоземельными элементами

Для MCVD метода процесс легирования схематично изображен на рис.1.2.25. Редкоземельные активаторы (соединения эрбия, иттербия, неодима и.т.д.) поступают в зону протекания реакции окисления вместе с другими активаторами, формирующими показатель преломления (например, германий, φocop, алюминий). Низкое давление пара редкоземельных реактивов компенсируется либо подведением источника пара ближе к зоне реакции и моментальным разбавлением его другими реактивами (рис 1.2.25, *а-в*), либо использованием активаторов в виде аэрозолей или органических соединений, обладающих более высоким давлением пара (рис.1.2.25,*г*-,*д*).



Рис.1.2.25. Технология легирования волокна в ходе MCVD-процесса

фритты Нагреваемый источник образуется при впитывании спиртового раствора хлоридов редких земель в пористый кварц, нанесенный на внутренние стенки MCVD-трубки (рис.1.2.25,*a*). Эта «губка», будучи нагретой до 900°С, высыхает и становится источником пара. В двух других способах (рис.1.2.25, б и в) напрямую используются нагретые дегидратированные хлориды в качестве источников пара. Процесс дегидратации (обезвоживания) в данном случае необходим, так как большинство хлоридов редких земель насыщено водой. На практике дегидратация осуществляется пропусканием через нагретое до 900°С вещество потока Cl_2 , SOCl₂, SF₆. Преимущество этого метода (в англоязычной литературе его называют - heated source injector нагреваемый источник инжекции хлоридов) состоит в том, что источник редкоземельного реактива изолирован, и исключены нежелательные

$$\Delta\lambda_{BG} = 2n\Lambda \left(\left(1 - \left(\frac{n^2}{2}\right) \left[P_{12} - \nu \left(P_{11} + P_{12} \right) \right] \right) \varepsilon + \left[\alpha + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right] \Delta T \right)$$
(1.3.3)

где ΔT - изменение температуры, ε - приложенное механическое напряжение, P_{ij} - коэффициенты Поккельса упруго-оптического тензора, v - коэффициент Пуассона, α - коэффициент теплового расширения кварцевого стекла, n - эффективный показатель преломления основной моды. Это соотношение дает типичные значения сдвига λ_{BG} в зависимости от температуры ~0.01 нм/К и от относительного удлинения световода ~ $10^3 \Delta L/L$ (нм).

1.3.1.3. Длиннопериодные волоконные решетки

Фотоиндуцированные длиннопериодные волоконные решетки имеют относительно большой период $\Lambda = 100$ - 500 мкм и связывает основную моду с модами оболочки, которые распространяются в том же направлении. Как правило, моды оболочки ведутся границей кварцевое стекло/воздух, которая образуется после удаления защитного покрытия с облучаемого участка световода. Энергия, перешедшая в оболочечную моду, затем поглощается в защитном покрытии на неочищенном участке световода, что приводит к появлению полосы поглощения в спектре пропускания световода с записанной в нем решеткой. Оболочка в рассматриваемом случае может направлять большое количество мод ~10⁴, однако лишь небольшое их число (а именно моды HE_{1m} и EH_{1n} , где т и п радиальные модовые числа) обладает значительной величиной интеграла перекрытия H_{LPG} с модой сердцевины, взятого по области, в которой наведена модуляция ПП (для фотоиндуцированных решеток такой областью является германосиликатная сердцевина световода).

Такие моды имеют аксиальную симметрию и число осцилляций вдоль радиуса световода, равное радиальному модовому числу. Интенсивность оболочечной моды на однородной решетке выражается как $S = \sin^2(kL)$. Коэффициент связи решетки, как и в случае ВБР, выражается соотношением $k = \pi \Delta n H_{LPG} / \lambda_{LPG}$, где λ_{LPG} - резонансная длина волны решетки с длинным периодом (в англоязычной литературе - long period grating - LPG). При этом спектральная ширина резонанса на полувысоте выражается следующим соотношением:

$$\Delta \lambda_{FWHM}^{IPG} \approx \frac{\lambda_{IPG} \Lambda}{\pi L} \sqrt{\pi^2 - (k_{LPG} L)^2}$$
(1.3.4)

Для иллюстрации на рис. 5.3.4, *а* представлен спектр пропускания ДПВР длиной 25 мм с периодом 230 мкм, рассчитанный для световода со ступенчатым профилем ПП в сердцевине (разность ПП между сердцевиной и оболочкой $\Delta n = 0.01$) и длиной волны отсечки первой высшей моды $\lambda_c = 1.0$ мкм. Величина индуцированного ПП равна 4·10⁻⁴.

рис.1.3.3(а) и (б), соответствуют решеткам с амплитудой модуляции наведенного ПП $\Delta n_{mod} = 5 \cdot 10^{-5}$ и 7.5 $\cdot 10^{-4}$ соответственно. Несмотря на одинаковую длину решеток, в согласии с формулой (1.3.2) их спектральная ширина различна и составляет 0.18 нм и 0.64 нм соответственно.



Рис.1.3.3. Спектр отражения R (сплошная кривая) и групповая задержка τ (штриховая кривая) однородных брэгговских решеток с различной амплитудой модуляции наведенного ПП: Δn_{mod} = 5·10⁻⁵ (a), Δn_{mod} = 7.5·10⁻⁴ (б). На врезках: схематический профиль ПП, наведенного в решетках

Отметим, что ВБР может быть изготовлена не только с постоянным, но и с изменяющимся по длине периодом. Для подавления боковых максимумов, хорошо заметных в спектрах решеток на рис.1.2.3, ВБР может быть сделана со сглаженным вдоль оси распределением амплитуды модуляции индуцированного ПП.

Резонансная длина волны брэгговских решеток λ_{BG} зависит от температуры световода и от приложенных к нему механических растягивающих или сжимающих напряжений. Эта зависимость описывается следующим уравнением:

реакции с реактивами *SiCl₄*, *GeCl₄* или *POCl₄*, вводимыми для увеличения показателя преломления.

Как разновидность метода, использующего нагретый источник хлоридов, разработан двухстадийный процесс, т.н. «транспортировка-иокисление» (transport-and-oxidation). В этом случае пары редкоземельного хлорида сначала осаждаются на внутренних стенках трубы, а затем начинается собственно окисление при высоких температурах. Получаемое таким образом одномодовое волокно, состоящее из P_2O_5 -SiO₂ оболочки и Yb_2O_3 -SiO₂ ядра, замечательно тем, что в этом случае увеличение показателя преломления сердцевины достигается за счет введения редкоземельного активатора. 1мол% Yb_2O_3 -SiO₂ в составе сердцевины обеспечивает прирост показателя преломления на 0.29% по сравнению с оболочкой.

Метод подведения редкоземельного активатора в виде аэрозоля позволил избавиться от необходимости нагрева источника, так как в этом случае реактив поступает сразу в виде пара (рис.1.2.25,*г*). Особенность этого метода заключается в возможности изготавливать аэрозоль отдельно и подавать суспензию из капель редкоземельного активатора по подводящей трубе вместе с газом-носителем в MCVD-трубку. Для изготовления аэрозолей в этом способе применяется ультразвуковой распылитель (1.5 МГц), подобный используемым в увлажнителях помещений. Этот метод был опробован и на водных, и на органических растворах; он позволяет вводить свинец, натрий, галлий и некоторые редкоземельные элементы.

Подведение редкоземельных реактивов в виде паров может также осуществляться в органических соединениях, которые имеют более высокое давление пара, чем хлориды, бромиды или йодиды. Кроме того, органические пары получают при нагреве всего лишь до 200°C, в противовес нескольким сотням градусов для хлоридов. Применение органических соединений редкоземельных элементов в MCVD-технологии показано на рис.1.2.25, д. В данном случае используются три линии подведения в виде вложенных трубок. Этот метод позволяет активировать сразу несколькими редкоземельными элементами, достигнуть высоких концентраций активатора, при этом получаемые волокна характеризуются фоновыми потерями 10дБ/км и содержанием гидроксильных групп ОН порядка 20 ppm (percent per million -процент на миллион). Подведение паров, аэрозолей или растворов редких земель может также использоваться для активации преформ в OVD или VAD процессах. В этом случае введение активатора может производиться либо во время осаждения пористого кварца (рис.1.2.25), либо уже после того, как сформирована заготовка-буля из пористого кварца (рис.1.2.26 и рис.1.2.27).

43



Рис.1.2.26. Процесс активации пористой кварцевой заготовки аэрозолями и парами редкоземельных элементов



Рис.1.2.27. Процесс активации пористой кварцевой заготовки парами редкоземельных элементов

В VAD технологии активаторы с низким давлением пара подводятся в комбинации аэрозоля и пара. В OVD методе активация церием, неодимом И эрбием производится введением паров органических растворов редких земель непосредственно в пламя реакции, как показано на рис.1.2.25, б. Церий, например, используется в виде органического бета-дикетоната (beta-diketonate) церия соединения $(Ce(fod)_{4}).$ Это соединение имеет высокое давление пара, что позволяет использовать для его подведения традиционную систему. Другой тип соединений с высоким давлением пара – хелаты редких земель $RE(thd)_3$ (2,2,6,6-тетраметил-3,5гептанедион). Таким способом были получены неодимовые волокна с концентрацией Nd₂O₃ 1 вес % с фоновыми потерями 10 дБ/км для высокомощных волоконных лазеров. Этим же способом были получены волокна с концентрацией Yb₂O₃ 11вес % для волоконных лазеров с двойной оболочкой.

Примечательно, что одна и та же решетка на разных длинах волн может связывать основную моду сердцевины с модами различных типов и направлений распространения. Так, на ВБР могут возбуждаться оболочечные моды с коротковолновой стороны относительно основной полосы отражения, что, как правило, наблюдается в решетках с большим коэффициентом отражения.

В дополнение к вышеперечисленным типам решеток следует упомянуть о менее распространенных, но также имеющих ряд интересных применений так называемых модовых и поляризационных конвертерах. В модовых конверторах, записанных В маломодовых волоконных световодах, происходит перевод излучения из одной моды сердцевины в Аналогичный процесс реализуется В поляризационных другую. конвертерах, где на решетке, записанной в двулучепреломляющем волоконном световоде, осуществляется взаимодействие мод, имеющих взаимно перпендикулярное направление поляризации электрического поля. В обоих случаях период решетки совпадает с периодом межмодовых биений на резонансной длине волны.

1.3.1.2. Волоконные брэгговские решетки с малым периодом

Волоконные брэгговские решетки связывают основную моду световода с той же модой, распространяющейся в противоположном направлении. Это означает, ЧТО на определенной длине волны распространяющееся по световоду излучение отражается от решетки полностью или частично. Свойства этого отражения зависят от параметров решетки. Для однородной решетки длины L коэффициент отражения R на резонансной длине волны λ_{BG} выражается как $R = \text{th}^2(kL)$, где $k = \pi \Delta n_{mod}h / L$ λ_{BG} - коэффициент связи (Δ*n_{mod}* - амплитуда синусоидальной модуляции ПП, *h* - часть мощности основной моды, которая распространяется по сердцевине световода).

Спектральная ширина резонанса однородной решетки на полувысоте (в англоязычной литературе – full width at half maximum - FWHM) может быть выражена следующим приближенным соотношением:

$$\Delta \lambda_{FWHM}^{BG} \approx 2\lambda_{BG} \alpha \sqrt{\left(\frac{\eta_{BG} \Delta n_{\text{mod}}}{2n_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{\Lambda}{L}\right)^2}$$
(1.3.2)

где α - параметр порядка единицы для глубоких решеток и порядка 0.5 для решеток небольшой глубины. Как видно из (1.3.2), спектральная ширина зависит не только от длины решетки и ее периода, но также и от амплитуды модуляции ПП Δn_{mod} .

На рис.1.2.3 представлены спектральные зависимости коэффициента отражения R и групповой задержки τ , рассчитанные для однородных ВБР длиной L = 5 мм. Спектральные характеристики, приведенные на



Рис.1.3.2. Диаграмма, демонстрирующая выполнение условия фазового синхронизма между основной модой волоконного световода HE₁₁ (LP₀₁) и другими модами

Рассмотрим взаимодействие основной моды волоконного световода *HE*₁₁ (*LP*₀₁) с другими направляемыми и излучательными модами. На рис.1.3.2 приведены различные типы межмодовой связи для N=1. По вертикальной оси отложен эффективный ПП мод световода, причем n_{co}, n_{cl} и n_{ext} - ПП сердцевины, оболочки и внешней среды соответственно. направления Положительное отрицательное вертикальной И оси характеризуют моды световода, распространяющиеся по отношению к исходной основной моде *HE*₁₁ в прямом и обратном направлениях соответственно. На рисунке схематически показаны дисперсионные кривые для мод сердцевины ($n_{cl} < n_{eff} < n_{co}$) и оболочки ($n_{ext} < n_{eff} < n_{cl}$). Заштрихованная область соответствует излучательным модам световода. Пунктирными линиями 1 и 2 обозначены значения (n^{core}_{eff} - λ / Λ) для решеток с малым (волоконные брэгговские решетки - ВБР) Л_{sp} и большим (длиннопериодные волоконные решетки $ДПВР) \Lambda_{ln}$ периодами соответственно (n^{core} eff - эффективный ПП основной моды). Пересечения этих кривых с дисперсионными кривыми различных мод задают длины волн, на которых выполняется условие фазового синхронизма (1.3.1). Отметим, что при больших периодах на решетке возникает связь с модами, распространяющимися в том же направлении, а при малых - с модами, имеющими противоположное направление распространения. Рис.1.3.2 наглядно иллюстрирует связь основной моды сердцевины с различными модами сердцевины (a, f, g), оболочки (b, e) и излучательными модами (c, d), распространяющимися в прямом (a - c) и обратном (d - g) направлениях.

Пористые заготовки-були, полученные в процессе OVD или VAD, подвергаются второму высушиванию и обжигу, что открывает новые возможности для введения активатора. Так, на рис.1.2.28 показан процессе активации парами редкоземельных элементов путем диффузии в процессе обжига. Контроль за концентрацией активатора осуществляется через данные о концентрации активатора в атмосфере обжига и размерах пор или плотности пористой заготовки. Другие активаторы, например *AlCl*₃ и хлор, успешно вводятся по этой технологии.



Рис.1.2.28. Процесс активации парами редкоземельных элементов путем диффузии в процессе обжига

В VAD методе активирование заготовки для сердцевины можно производить самыми разными способами. Например, оболочка может отдельно наноситься на сердцевину, с последующим обжигом для образования преформ. Сердцевина активированного редкоземельными элементами волокна может быть получена методом высокочастотной плазмы (рис.1.2.29). Эта техника используется для проверки возможности введения концентраций редких земель высоких В волокно для малогабаритного волоконного усилителя. Этот метод позволяет создать сердцевину волокна с 18 вес% эрбия и 5.0 вес % алюминия. Время жизни в таком волокне составляет 9.5 мс. Сделанный из этого эрбия высококонцентрированного волокна усилитель показал эффективность преобразования мощности 75% на длине волны 1.5 мкм. Подобная технология также используется для изготовления силикатных стекол, активированных неодимом и со-активированных алюминием и фосфором.



Рис.1.2.29. Метод высокочастотной плазмы, используемый для изготовления VAD стержней-заготовок

1.2.3.2. Методы активирования редкоземельными элементами из растворов

Одним из первых способов введения нелетучих галогенидов в высокочистые волоконные заготовки-преформы с использованием жидкой фазы был метод пропитывания (impegnation) пор. Сначала делалась чистая силикатная заготовка методом огненного гидролиза. Ее пористость составляла от 60% до 90% (диаметр пор от 0.001 до 10 мкм). Заготовкабуля выдерживалась в течение часа в метаноловом растворе солей активатора и затем высушивалась в течение 24 часов, после чего заготовкабуля обжигалась в атмосфере *He-O₂-Cl₂* для избавления от пузырьков (рис.1.2.28). Концентрация активатора контролировалась через концентрацию ионов в растворе. Эта обобщенная технология, позже известная как молекулярное заполнение (в англоязычной литературе molecular stuffing), использовалась для введения Nd в силикатное волокно.

В дальнейшем появилась разновидность этого метода, совмещавшая MCVD и активирование из раствора (рис.1.2.30). Первый этап в данном случае это нанесение необожженного (пористого) слоя кремния внутрь силикатной трубки посредством MCVD. Пористый слой затем активируется заполнением водным раствором хлоридов редких земель; этот раствор оставляют внутри примерно на час, затем удаляют из трубки. Пропитанный слой высушивается при высоких температурах В хлористо-кислородной Вещества. присутствие потоков смеси. преломления, например повышающие показатель алюминий, также вводятся посредством этого метода. Хотя этот процесс кажется не очень эффективным с точки зрения чистоты, однако полученные таким способом волокна обладают фоновыми потерями порядка 0.3 дБ/км. Этот общий метод также может варьироваться посредством использования вместо

Преимущества волоконных фотоиндуцированных решеток В сравнении с альтернативными технологиями (например, интерференционные зеркала и объемные дифракционные решетки) разнообразие очевидны: широкое получаемых спектральных И характеристик, многие ИЗ которых могут дисперсионных быть реализованы только на основе волоконных решеток ПП; полностью волоконное исполнение; низкие оптические потери; относительная простота изготовления и ряд других.

Излучение, распространяющееся по волоконному световоду, можно представить в виде комбинации его собственных мод: направляемых и излучательных. Направляемым модам соответствует дискретный спектр постоянных распространения β_i , в то время как излучательные моды образуют континуум. В отсутствие возмущений в волоконном световоде эти моды распространяются без взаимодействия друг с другом.

Структура волоконной решетки ПП выбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимое резонансное взаимодействие между выбранными модами световода. Отметим, что теория резонансных взаимодействий на периодических структурах детально разработана и широко используется в различных областях физики, и в большинстве применима для описания свойств волоконных решеток. случаев Взаимодействие мод световода обычно описывается с помощью теории связанных мод, в рамках которой предполагается, что на определенной длине волны только две моды удовлетворяют условию фазового синхронизма и таким образом могут эффективно передавать друг другу энергию. Кроме того, предполагается, что поля мод в присутствии слабого периодического возмущения остаются неизменными. Указанные условия выполняются в большинстве случаев, рассмотренных ниже.

Рассмотрим однородную решетку ПП, то есть структуру с постоянным периодом *Л*. Две моды взаимодействуют на такой решетке, если выполняется условие фазового синхронизма

$$\beta_2 - \beta_1 = 2\pi N / \Lambda \tag{1.3.1}$$

где β_1 и β_2 - постоянные распространения рассматриваемых мод, N - целое число, характеризующее порядок, в котором реализуется межмодовое взаимодействие. Постоянная распространения моды выражается соотношением $\beta = 2\pi n_{eff} / \lambda$, где n_{eff} - эффективный ПП моды, λ - длина волны в вакууме.

что в результате френелевского отражения от противоположного торца волоконного световода в нем возникает стоячая волна, в максимумах которой изменяется ПП, образуя таким образом решетку, отражающую излучение в соответствии с условием Брэгга и усиливающуюся по мере облучения. Позже было показано, что процесс фотоиндуцированного изменения (увеличения) ΠП видимым излучением является двухфотонным. В 1989 году была предложена запись решеток ПП в германосиликатном световоде ультрафиолетовым излучением через его которой используется однофотонное боковую поверхность, при возбуждение полосы поглощения германосиликатного стекла. Именно тогда была показана возможность изменения спектральных параметров решеток в весьма широких пределах, что очертило реальные перспективы волоконных решеток для практических применений, стимулировало активные исследования в области создания фотоиндуцированных структур в волоконных световодах.

1.3.1. Брэгговские волоконные решетки показателя преломления

Брэгговскаая волоконная решетка показателя преломления (в - fiber Bragg grating – FBG) англоязычной литературе ее называют представляет собой участок волоконного световода (как правило, одномодового), в сердцевине которого наведена периодическая структура ПП имеющая определенное периодом Λ. пространственное с распределение, схематически показанное на рис.1.3.1. Как правило, решетка формируется в фоточувствительной сердцевине световода 1, в то время как ПП кварцевой оболочки 2 остается неизменным. Такая структура обладает уникальными спектральными характеристиками, которые и определяют ее широкое применение в различных устройствах волоконной оптики. Наиболее важным свойством волоконных брэгговских является узкополосное отражение оптического излучения, решеток относительная спектральная ширина которого может составлять 10⁻⁶ и меньше.



Рис.1.3.1. Схематическое изображение волоконной решетки показателя преломления

водного раствора спиртовых, эфирных, или кетоновых растворителей для Al^{3+} и галогенидов редких земель. Растворимость нитратов, бромидов и хлоридов редких земель различается, однако все они могут использоваться. Волокна, изготовленные с использованием безводных растворов, отличаются низким содержанием гидроксильных групп и поглощением на длине волны 1.38 мкм менее 10дБ/м. Использование водных растворов также позволяет изготовлять волокна с низким содержанием ОН-групп с привлечением специальных методов дегидратации. Описанный метод активации из раствора позволяет вводить до 33 вес% P_2O_5 , как того требуют *Er-Yb* активированные материалы. Высокие концентрации P₂O₅ достигаются использованием расплавов чистой ортофосфорной кислоты H_3PO_4 с ионами редкоземельных элементов вместо водного растворе для насыщения пористого слоя. Пропитанный пористый слой затем быстро нагревают в присутствии Cl₂ и О₂ для полного завершения реакции. Достигнутый в том методе уровень концентрации редких земель составляет 3 мол%.



Рис.1.2.30. Активирование из раствора в MCVD методе

С появлением активированных редкоземельными элементами волоконных усилителей стало ясно, что локализация активатора в центральной части сердцевины необходима для использования в системах с низким порогом. Кроме того, очень важную роль играет однородность распределения активатора. Для улучшения тих параметров был разработан другой MCVD метод активации, известный как золь-гель покрытие, наносимое погружением (sol-gel dip coating). По этой технологии внутренняя часть MCVD-трубки покрывается золем с редкоземельными элементами, который затем переходит в гель и оставляет тонкий слой активатора (рис.1.2.31).



Рис.1.2.31. Золь-гель покрытие (sol-gel dip coating) в MCVD методе

В этом методе могут совмещаться редкие земли и повышающие показатель преломления активаторы. Наносимый золь образуется при гидролизе смеси из растворимых соединений редкоземельных элементов с $SiO(C_2H_5)_4$. Вязкость геля медленно увеличивается, по мере того, как в результате гидролиза полимеризуются реагенты. За нанесением пленки следует заполнение MCVD-трубки гелем и высушивание. Толщина слоя геля контролируется через вязкость геля, которая в свою очередь определяется его возрастом и скоростью высушивания. Типичная толщина пленки составляет порядка долей микрометра, что позволяет получить область локализации активатора. Трубка ограниченную затем возвращается на технологическую линию для дальнейшей обработки.

1.2.3.3. Метод трубки и штабика

Первые оптические волокна вытягивались из преформ определенных размеров и параметров, состоящих из штабика (сердцевины) и оболочки в виде трубки. Современные вариации этой технологии используются для изготовления сердцевин волокна сложных составов. Для сохранения совместимости с стандартным телекоммуникационным волокном небольшой стеклянный штабик со сложным составом помещается внутрь толстостенной силикатной трубки. Эта конструкция затем вытягивается в волокно при высоких температурах, необходимых для силикатной трубки. В результате чего улетучиваются нестабильные компоненты. По длине полученное волокно вполне пригодно для практического использования.

Возросший интерес к эрбиевым волоконным усилителям породил необходимость в методе изготовления активированных волокон с высокой однородностью и низкой концентрацией активатора. Как правило, для

этого используются методы активации из растворов и «outside process». Но и технология штабика в трубке также позволяет получить низкие концентрации активатора. В этом случае редкая земля вводится в MCVD преформ, который и является сердцевиной волокна с внешним диаметром 150 мкм и диаметром сердцевины 10 мкм (рис.1.2.32).



Рис.1.2.32. Использование технологии штабика и трубки для активирования в MCVD методе

Изготовленные этим методом волокна обладают очень низкими собственными потерями 0.35 дБ/км на длине волны 1.62 мкм. Поглощение из основного состояния на длине волны 1.53 мкм составляет порядка 1дБ/км (примерно 1 ppm Er) обусловлено сердцевиной волокна с концентрацией эрбия порядка 1400 ppm при диаметре 10 мкм. Этот метод в целом несколько отличается от традиционного «штабика в трубке», где стерженевая заготовка эффективно растворяется в сердцевине главного преформа. Наличие растворенных компонент обнаруживается в различии спектра люминесценции исходной заготовки и окончательного волокна в усилителе.

1.3. Фотоиндуцированные волоконные брэгговские решетки и их технологии

Фоточувствительность легированного кварцевого стекла, то есть его способность изменять показатель преломления (ПП) под действием излучения, в настоящее время активно исследуется и имеет широкое применение в системах волоконно-оптической связи, волоконных лазерах, системах измерения различных физических величин и др. Формирование стабильных во времени решеток в волоконных световодах впервые было обнаружено в 1978 году. Излучение аргонового лазера было введено в сердцевину германосиликатного световода, и через несколько минут было зафиксировано интенсивное отраженное излучение, возникшее из-за некоторой модификации свойств световода. Явление было объяснено тем,